

Indicadores de seguridad de la infraestructura viaria en los accidentes por Salida de Vía. Revisión de la velocidad límite

Autor: Guillermo Beltrán Rodat

Tutor: Sergi Saurí Marchán

RESUMEN

Los límites de velocidad en la carretera se han fijado normalmente siguiendo criterios de poca consistencia científica basados en argumentos convencionales. Se pretende en esta tesina crear una metodología para redefinir la velocidad límite atendiendo a unos condicionamientos técnicos y a unos principios científicos válidos. Como último fin se prevé que esta redefinición se vea traducida en una disminución de los heridos graves y fallecidos en accidentes de carretera.

Para ello se ha partido de indicadores de seguridad vial. Actualmente, a los indicadores se los considera herramientas objetivas que proporcionan gran información acerca del estado real de la infraestructura de las carreteras.

Así pues, se han definido dos indicadores de seguridad vial que evalúan las características de la infraestructura en función de la velocidad de circulación. El primero, el índice de riesgo (I_R), evalúa los factores que incorpora la carretera para evitar que se produzcan accidentes (factores de seguridad activa). Este índice se fundamenta matemáticamente bajo los principios de la lógica difusa y está estructurado, básicamente, a partir de tres indicadores parciales que examinan la peligrosidad debido a las curvas, a las dimensiones de la plataforma y al estado del pavimento respectivamente. El segundo, llamado índice de gravedad (I_G), evalúa los elementos que protegen al conductor en caso de accidente (factores de seguridad pasiva) y su cálculo parte de los estudios del consorcio EuroRAP. Ambos índices están basados en una tipología concreta de accidente (la salida de vía) y se centran en las vías interurbanas con un carril por cada sentido de circulación. Por otra parte, cabe destacar que el cálculo de los índices está pensado para aplicarse sobre tramos o secciones de carretera de características homogéneas en la medida de lo posible.

Definidos ya I_R e I_G se propone un modelo de redefinición de la velocidad límite en carreteras. A partir del valor que toman los índices se crea un diagrama de velocidades en el que el tramo de carretera evaluado se sitúa en alguna región concreta del diagrama. Dependiendo de la región en la que se encuentre el tramo analizado, se aplica una función (función objetivo) que varía el valor de la velocidad límite hasta obtener una valoración del riesgo a sufrir un accidente (I_R) y de la protección que ofrece la vía en el caso de que ocurra (I_G) óptima.

Para validar tanto el cálculo de los índices como el modelo de redefinición se ha aplicado toda la metodología en una carretera real conocida por su alto historial de accidentalidad y siniestralidad: la C-43. Los resultados obtenidos adelantan que la metodología no carece de sentido y que constituye una herramienta válida para ayudar, tanto a proyectistas como a las administraciones titulares de las carreteras, a fijar las velocidades permitidas en la vía. No obstante, haría falta llevar a cabo una validación más amplia sobre otros tramos de carretera para completar la validación total del modelo.

Por último, se realiza un análisis crítico de todo el trabajo que se traduce en un listado de conclusiones que dan por finalizada la tesina. En el listado se detallan también las posibles mejoras y líneas de investigación futuras.

La tesina desarrollada está enmarcada dentro del proyecto de investigación REVEL (REvisión de VELocidades) y ha sido realizada en el Centro de Innovación del Transporte (CENIT).

ABSTRACT

Speed limit on roads usually have been fixed according to little scientific criteria based on conventional reasoning. This dissertation presents a methodology with valid scientific principles to define speed limits. As a final purpose this new methodology is expected to result in a reduction of the number of seriously injured people or deaths in road accidents.

For this reason, safety road indicators have been used. Nowadays, safety indicators are considered to be objective tools that offer great information about the real condition of the road infrastructure.

Thus, two safety indicators with the capacity of evaluating infrastructure characteristics depending on travelling speed have been created. First, the risk rate indicator (I_R) evaluates the road components set to avoid accidents (active safety factors). This indicator is mathematically based on the Fuzzy Set theory and it is basically carried out from three partial indexes that examine riskiness due to curves, lane dimensions and road surface state. The second one, called seriousness indicator (I_G), evaluates the road elements that protect drivers in case of accidents (passive safety factors) and its calculation works with se results given by the EuroRAP's consortium studies. Both indicators are based on a specific kind of accident (the run-off) and are focused on rural roads with one lane per driving way. On the other hand, it is worth mentioning that the indicator's calculation is meant to be applied on road stretches or sections with homogeneous characteristics insofar as possible.

With I_R and I_G defined, the dissertation presents a new speed limit model. According to the indicator's value, a speedchart diagram is created. Each analyzed stretch of road finds a position inside the diagram. Depending on the diagram's region where the stretch is located, a function (called objective function) varies the speed limit value until the risk of suffering and accident (I_R) and the protection offered by the road (I_G) is optimum.

In order to validate both the indicator's calculation and the speed limit model, the methodology has been put into practice on a real road known to have a high accident and fatality rate: the C-43. The obtained results bring forward that the methodology doesn't lack sense and constitutes a valid tool to help road managers and administrations to fix permitted speeds. However, it needs a more extended vaildation (applied to a bigger number of roads) to prove the model.

Finally, a critical analysis of the dissertation has been carried out, followed by a list of conclusions. These conclusions include the possible improvements of the methodology and also the future research lines.

The dissertation is within the framework of the REVEL research project and has been developed at the Center for Innovation in Transport (CENIT).

AGRADECIMIENTOS

Quiero mostrar mis agradecimientos a todo el equipo del CENIT por haberme dado la oportunidad de trabajar con ellos durante varios meses y, especialmente, a mi tutor Sergi Saurí, sin cuya ayuda y dedicación no se habría podido llevar a cabo la tesina.

ÍNDICE:

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Proyecto REVEL	2
1.3	Objetivos	2
1.4	Enfoque	3
1.5	Estructura de la tesina	5
2	ESTADO DEL ARTE	7
2.1	Introducción	7
2.2	Filosofías de los programas de seguridad vial	8
2.2.1	Principios	8
2.2.2	La filosofía holandesa: Sustainable Road Safety	8
2.2.3	La filosofía sueca: Vision Zero	14
2.3	EuroRAP	18
2.3.1	Introducción y objetivos	18
2.3.2	Agentes implicados	19
2.3.3	Metodología	19
2.3.4	Expansión de EuroRAP	25
2.3.5	Conclusiones	26
3	EVALUACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIARIA	27
3.1	Introducción	27
3.2	Determinación del indicador de riesgo I_R	27
3.2.1	Soporte matemático	28
3.2.2	Evaluación del riesgo en alineaciones curvas (δ_1)	30
3.2.3	Evaluación del riesgo por las dimensiones de la plataforma (δ_2)	44
3.2.4	Evaluación del riesgo por el estado del pavimento (δ_3)	54
3.2.5	Unión de δ_1 , δ_2 y δ_3	61
3.2.6	Factor correctivo γ	64
3.2.7	Cálculo de I_R	67
3.2.8	Análisis crítico	69
3.3	Determinación del indicador de gravedad I_G	70
3.3.1	Antecedentes	70
3.3.2	Metodología de cálculo	71
3.3.3	Cálculo de I_G	73
3.3.4	Ejemplo de cálculo	74
3.3.5	Asignación de estrellas	74
3.3.6	Análisis crítico	74

4	REDEFINICIÓN DE LA VELOCIDAD LÍMITE	77
4.1	Introducción	77
4.2	Creación de subgrupos	77
4.3	Diagrama de velocidades	79
4.4	Función objetivo de las celdas	81
4.5	Aplicaciones	85
4.6	Conclusiones	87
5	VALIDACIÓN Y TRABAJO DE CAMPO	89
5.1	Introducción	89
5.2	Validación teórica	89
5.3	Validación por mapas	90
5.4	Aplicación real	92
5.4.1	Descripción de la carretera	92
5.4.2	Trabajo de campo	94
5.4.3	Interpretación de resultados	95
5.4.4	Velocidad límite propuesta	95
5.5	Consideración final	97
6	CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS	99
7	REFERENCIAS	101
8	ANEJOS	103

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES

Hoy en día, el número de accidentes y, sobre todo, la cantidad de víctimas que todos los años se producen en las carreteras son una preocupación grave de las administraciones públicas y de la sociedad en general, que intentan su disminución mediante diversas medidas.

En el año 2006 se registraron en las carreteras europeas 1.277.126 accidentes, en los que fallecieron 42.953 personas (CARE, 2007). Además del trauma emocional que supone la pérdida de vidas humanas, se calcula que estas muertes provocaron unas pérdidas económicas que ascienden a más de $34 \cdot 10^9$ euros (J. Monclús, 2008). En la tabla 1 se muestran los datos de víctimas en accidentes de carretera en España durante una década, desde el año 1996 hasta el 2006:

Tabla 1. Estadísticas de víctimas en carreteras españolas entre 1996 y 2006

AÑO	MUERTOS	HERIDOS GRAVES	HERIDOS LEVES	TOTAL
1996	5.483	33.899	90.258	129.640
1997	5.604	33.915	91.332	130.851
1998	5.957	34.664	106.713	147.334
1999	5.738	31.883	111.011	148.632
2000	5.776	27.764	122.017	155.557
2001	5.517	26.566	123.033	155.116
2002	5.347	26.156	120.761	152.264
2003	5.399	26.305	124.330	156.034
2004	4.741	21.805	116.578	143.124
2005	4.442	21.859	110.950	137.251
2006	4.104	21.382	122.068	147.554

Fuente: EU road accidents database

Las muertes en carretera supusieron en el 2006 el 82% del total de muertes accidentales en España (L. Puerto, 2007). En las últimas décadas, el gran número de víctimas ocasionadas en las carreteras ha pasado a constituir un problema nacional de primer orden.

Las causas de los accidentes se suelen atribuir a diversos motivos, que van desde imprudencias cometidas por el conductor hasta una mala señalización o un mal estado de la carretera. Uno de los factores a los que más se acusa como causante de los accidentes de tráfico es la velocidad inadecuada a la que se circula. Existe, por lo tanto, una asociación entre los conceptos de velocidad y riesgo que puede ser analizada para entender con mayor profundidad la influencia de la velocidad en los accidentes.

La relación entre la velocidad y la inseguridad de la circulación es muy compleja, pues en ella influyen factores relacionados con el vehículo, con la carretera y con las condiciones de tráfico, además del comportamiento del conductor y de las condiciones ambientales. En el proyecto REVEL, que se describe en el siguiente apartado y del que la tesina forma parte, se profundiza en esta relación, lo cual supone una nueva manera de afrontar el problema de los accidentes de tráfico dentro del ámbito de la seguridad vial.

1.2 PROYECTO REVEL

El proyecto REVEL (REvisión de los límites de VElocidad), que está subvencionado por el CEDEX, nace con el objetivo principal de formular una metodología para fijar un límite de velocidad adecuado para cada tramo de carretera: un límite que dependa de las características técnicas del tramo y de las circunstancias del entorno y de la circulación, asociándose las nociones de velocidad y de riesgo. El límite así establecido debería resultar más asumible por los conductores que los actuales.

La velocidad límite en carreteras se ha fijado normalmente siguiendo criterios con poca consistencia científica basados en argumentos convencionales y ha sido promovida muchas veces según motivaciones políticas. Así pues, el proyecto REVEL pretende redefinir la velocidad límite atendiendo a unos principios científicos y a unos condicionamientos técnicos mediante el asesoramiento de expertos en seguridad vial de varios centros y universidades españolas. Como último fin, se prevé que esta redefinición de la velocidad se vea traducida en una disminución de heridos graves y fallecidos en accidentes de carretera.

1.3 OBJETIVOS

Con la elaboración de este trabajo se pretende definir una metodología que permita valorar el nivel de riesgo de accidente debido a la infraestructura vial y poder así establecer límites de velocidad. Para ello se considerará el papel que juega la infraestructura dentro de la seguridad vial y se la relacionará con la velocidad de circulación.

El modelo de redefinición del límite de velocidad se construirá a partir de varios indicadores de seguridad de la carretera, que evalúan el riesgo a sufrir un accidente y su gravedad según las características de diseño de la vía.

Por las características del modelo, éste podrá ser aplicado en cualquier tipo de carretera interurbana con un carril por cada sentido de circulación, lo que finalmente ayudará, tanto a proyectistas como a administradores de la infraestructura, a fijar las velocidades permitidas para este tipo de vías.

1.4 ENFOQUE

Desde los círculos de investigadores en seguridad vial, existe la aceptación generalizada de que los accidentes de tráfico son fruto de la interacción de tres de elementos: conductor, vehículo e infraestructura.

Históricamente se ha culpado al conductor de ser el responsable directo de los accidentes debido a un comportamiento inadecuado durante la conducción, sin tener en cuenta el peso de los otros dos factores. De hecho, la legislación siempre atribuye la causa de un accidente al conductor mediante una sanción.

Desde los años 80, la industria automovilística se ha esforzado en potenciar los sistemas de seguridad dentro del vehículo, cosa que ha contribuido en una reducción considerable de la siniestralidad en la carretera. De esta manera, se ha ido minimizando el peso del factor vehículo dentro del triángulo conductor-vehículo-infraestructura.

La infraestructura es el factor que ha sido obviado durante mucho tiempo. Su importancia es mucho mayor que la que en un principio se podría imaginar: el 30% de los accidentes de tráfico en Europa son atribuibles a las características y estado de las carreteras (L. Puerto, 2007). No es de sorprender que países como Holanda, Gran Bretaña, Suecia o Noruega hayan experimentado una considerable disminución en el número de accidentes desde que sus programas de seguridad vial consideran la infraestructura como un elemento más a tener en cuenta entre las causas de los accidentes.

En España, la mejora de la red de carreteras durante las últimas décadas no ha ido acompañada de un enfoque sistemático que tuviera debidamente en cuenta la importancia de los elementos de la infraestructura. Basta revisar los diferentes planes de carreteras que, tanto a nivel nacional como autonómico, se han realizado en estos últimos años para darse cuenta de tal carencia.

En la tesina que se desarrolla, se va a considerar únicamente a la infraestructura como elemento generador o causante de accidentes. De esta manera se intentará paliar la carencia de estudios sobre este ámbito. Por otra parte, solamente se tratarán las carreteras interurbanas, que son aquellas en las que más influencia tiene el estado y características de la infraestructura en la accidentalidad. Asimismo, se tendrá en cuenta para la evaluación del riesgo asociado a las carreteras una única tipología de accidente: la salida de vía. La elección de este tipo de accidente viene motivada por dos razones fundamentales:

- En primer lugar, es el tipo de accidente que con más frecuencia ocurre en las carreteras interurbanas. De entre los tres tipos de accidentes más habituales (salidas de vía, colisiones frontales y choques en intersecciones), las salidas de vía suponen el 43% de los accidentes en Europa (L. Puerto, 2007).

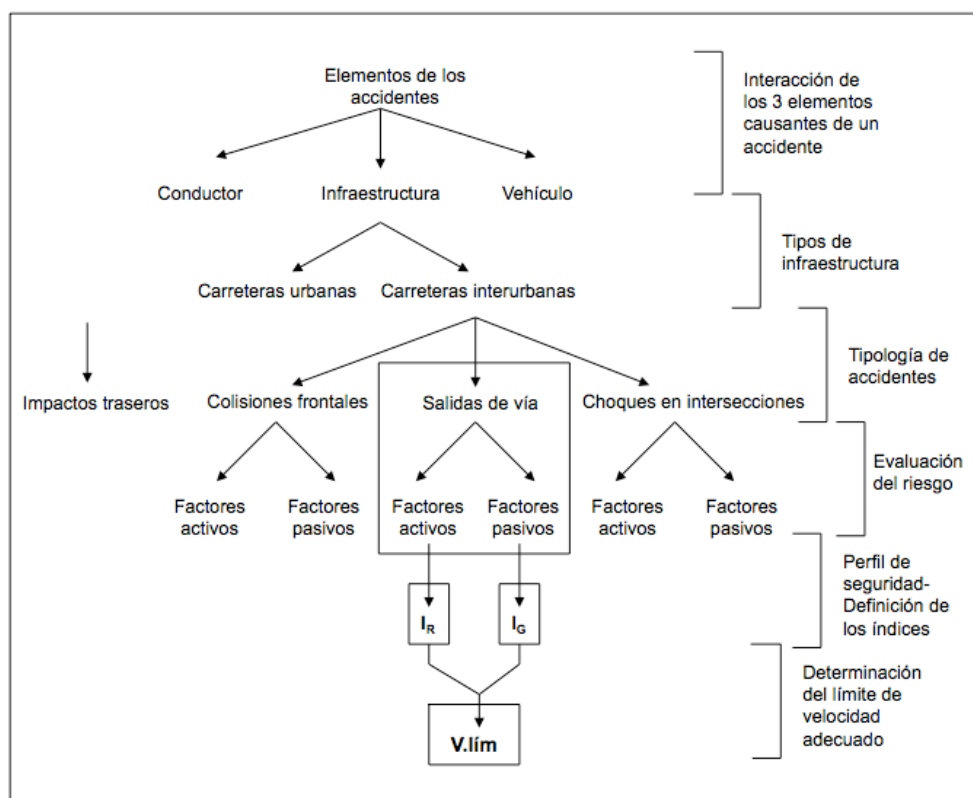
- En segundo lugar, es el tipo de accidente más directamente ligado con las características de la infraestructura. Los otros dos se producen por la interacción entre varios vehículos; una colisión frontal o un choque en un cruce siempre estará condicionado por un factor sine qua non y, por lo tanto, será muy difícil aislar el peso que ha tenido la infraestructura dentro del accidente.

La seguridad de toda infraestructura vial está estructurada a partir de dos factores independientes. El primero, el factor de seguridad activa, se corresponde con las medidas que incorpora la carretera para evitar que se produzcan accidentes (diseño del trazado, calidad del asfalto, dimensiones de los arcones, señalización, etc.). El segundo, el de seguridad pasiva, considera las medidas que incorpora la carretera para minimizar la gravedad del accidente en el caso que se produzca (medianas, protecciones laterales, diseño de las intersecciones, etc.).

Durante el desarrollo del modelo, se van a tener en cuenta ambos factores para calcular un perfil de seguridad de las carreteras. Este perfil de seguridad será, a su vez, función de la velocidad de circulación del vehículo con lo que será posible definir una velocidad límite adecuada para cada tramo de carretera analizado.

Se esquematiza a continuación el enfoque considerado para el desarrollo del modelo:

Fig. 1. Enfoque del estudio



Fuente: Elaboración propia

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESINA

La siguiente tesina se compone de seis capítulos que siguen la estructura clásica de un trabajo de investigación.

En primer lugar, en el capítulo 2, se realiza un estado del arte sobre la evaluación del riesgo vial de las carreteras. En él se describen las nuevas filosofías adoptadas por algunos países europeos en sus programas de seguridad vial y también se explican las bases del programa EuroRAP, que es fruto de estas nuevas filosofías y que tiene la particularidad de haber utilizado por primera vez un protocolo para la evaluación de la seguridad pasiva presente en las carreteras.

En el tercer capítulo se da una metodología para calcular dos indicadores de la infraestructura asociados a la seguridad que ofrece la carretera al circular por ella. Estos son el índice de riesgo I_R y el de gravedad I_G . El primero evalúa los factores de seguridad activa de la carretera (los que impiden la generación de accidentes), mientras que el segundo evalúa los factores de seguridad pasiva (los que protegen al conductor en caso de accidente). El resultado de los dos índices permite definir un perfil de seguridad de la infraestructura vial que se esté evaluando.

A continuación, en el capítulo 4, se propone un modelo para calcular un límite de velocidad adecuado en una carretera partiendo de los valores de I_R e I_G . La velocidad límite propuesta atiende a unas pautas científicas y no está fijada arbitrariamente (que es como se fija en la actualidad).

El capítulo 5 valida el modelo de cálculo de los dos indicadores definidos en el tercer capítulo aplicando la metodología propuesta en un tramo real de carretera en Cataluña. Del valor de los indicadores se extrae una velocidad límite adecuada para este tramo. Los resultados obtenidos están incluidos dentro del mismo capítulo.

Por último, en el último capítulo (capítulo 6), se realiza un análisis crítico de todo el trabajo que se traduce en un listado de conclusiones que darán por finalizada la tesina.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

No es hasta entrada la década de los 90 cuando aparecen por primera vez indicadores de riesgo y seguridad asociados a la infraestructura de la carretera. El ámbito en el que se desarrollan los indicadores sigue estando en sus primeras fases de aplicación y, aunque las administraciones titulares de carreteras ya han reconocido su gran utilidad, continúan siendo un campo poco estudiado que deberá profundizarse durante los próximos años.

Estos indicadores aparecen con el motivo de afrontar el problema de la seguridad vial desde ópticas diferentes a las que hasta hace poco se han aplicado. La gestión tradicional de la seguridad vial por las administraciones titulares de las carreteras se basaba en la identificación de puntos negros, que son tramos de corta longitud en los que se producen una acumulación de accidentes (muchas veces imputables a la carretera). Las actuaciones principales iban encaminadas a la supresión de puntos negros. Aunque todavía no se hablaba de indicadores, la peligrosidad de una red venía dada por el número de puntos negros que contenía.

El problema principal de esta manera tradicional de proceder es que no se determinaba dónde había que intervenir prioritariamente con vistas a lograr sensibles reducciones de la accidentalidad, y no se disponía de un inventario de las características geométricas del trazado ni de la adherencia neumático/pavimento (E. Casquero, 2006). Por estos motivos, la metodología del “punto negro” ha quedado desfasada y se ha dado paso al uso de indicadores que evalúan la peligrosidad de las carreteras. A los indicadores se los considera herramientas objetivas que proporcionan gran información acerca del estado real de la infraestructura vial (ERSO, 2008).

El estado del arte está estructurado en dos partes bien diferenciadas. En primer lugar, se introducen las filosofías más recientes desarrolladas por algunos programas europeos de seguridad vial. Estos programas han dado lugar al asentamiento de las bases de EuroRAP, un programa europeo en el que por primera vez se ha evaluado la seguridad de la carretera según indicadores de la protección que ofrecen los elementos de la carretera en caso de accidente. En la segunda parte del estado del arte se describe el programa EuroRAP y sus dos protocolos de cálculo. Como se verá más adelante, el segundo protocolo (protocolo RPS) será uno de los puntos partida para desarrollar una metodología de evaluación del riesgo de la carretera en la tesina.

2.2 FILOSOFÍAS DE LOS PROGRAMAS DE SEGURIDAD VIAL

2.2.1 Principios

Tradicionalmente, los programas de seguridad vial se han basado en la identificación de puntos negros en las carreteras y de su posterior mejora, tal y como se ha explicado en la introducción del capítulo.

Desde los círculos de especialistas en la materia, se ha argumentado que esta manera de proceder funciona bien en áreas urbanas pero es más difícil de aplicar en carreteras interurbanas, ya que en este caso los accidentes no se suelen concentrar en un punto, sino que más bien están repartidos a lo largo de un tramo de carretera (K. Ogden, 1990) (M. Lydon, 1997). En estos casos, la aplicación de un paquete de medidas de seguridad generales en un tramo de carretera con deficiencias en su seguridad es más aconsejable que tratar de desarrollar una solución específica para cada punto conflictivo.

Las filosofías más recientes introducidas por algunos países siguen esta nueva tendencia y hacen hincapié en el desarrollo de programas de seguridad vial innovadores. Por ejemplo, hay países europeos en los que se han adoptado filosofías que integran a las carreteras dentro del entorno social y ambiental. Además, tienen en cuenta en su diseño la función específica que va a desarrollar la carretera y tratan la seguridad de una manera que considera a todos sus usuarios (conductores, peatones, ciclistas etc.). En particular, el programa sueco “Vision Zero” y el holandés “Sustainable Safety” son los que más reconocimiento y atención han recibido a nivel mundial. Estos programas se basan en filosofías modernas que introducen aspectos éticos y dan una visión más general de donde se puede actuar para reducir la accidentalidad.

En los siguientes apartados se resumen las características principales de estos dos programas de seguridad vial.

2.2.2 La filosofía holandesa: Sustainable Road Safety

La filosofía holandesa del “Sustainable Road Safety” es similar a la adoptada por los suecos en sus programas de seguridad vial. Esta idea nace en Holanda en los años 90, con el objetivo de desarrollar un sistema de carreteras más seguro. Según este concepto, no se puede crear una sociedad en la que se tolere que el transporte por carretera conlleva inevitablemente miles de muertos y heridos cada año.

El punto de partida de esta nueva filosofía es el de reducir considerablemente la probabilidad de los accidentes de carretera mediante la mejora del diseño de la infraestructura. Además, en aquellos lugares donde los accidentes se siguen sucediendo, la severidad de estos debe ser minimizada.

El concepto de seguridad se basa en el principio de que “el hombre es la referencia estándar”. Es decir, el factor humano y sus errores siempre estarán presentes y el sistema de transporte tiene que estar adaptado a esta realidad para que la gente conviva en seguridad (F. Wegman, 1995). Según este concepto, para que un sistema de tráfico sea seguro y sostenible se deben cumplir tres principios:

- Una infraestructura que esté adaptada a las limitaciones de las capacidades humanas mediante un diseño apropiado.
- Vehículos equipados con dispositivos contruidos para simplificar las labores del conductor y para protegerlo tanto como sea posible.
- Conductores y usuarios de la carretera que estén bien informados, educados y, donde sea necesario, controlados.

El programa de seguridad vial holandés se sustenta sobre tres pilares básicos: la funcionalidad, la homogeneidad y la predictibilidad. Todos ellos parten del principio de la previsión, por el que se intenta evitar que se produzcan accidentes antes de intentar buscar soluciones una vez ocurrido el accidente.

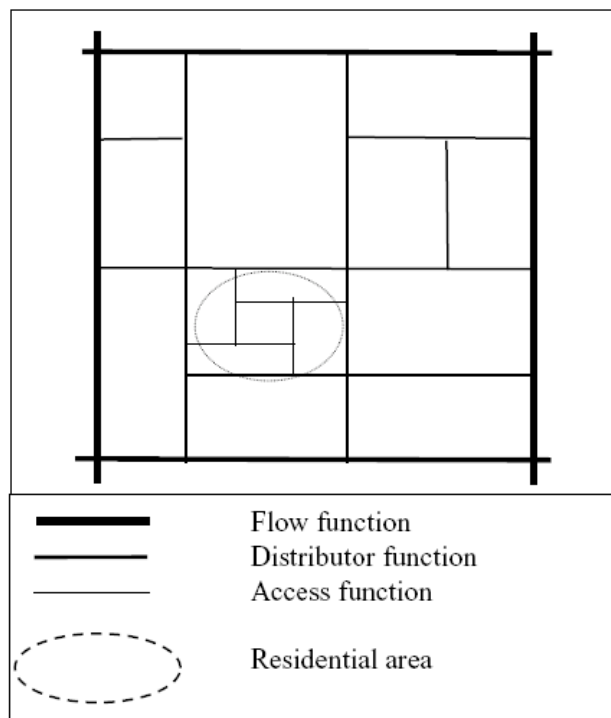
Según “Sustainable Road Safety” cada categoría de carretera requiere un diseño compatible con su función, al mismo tiempo que tiene que ofrecer una seguridad óptima. Para ello, todas las carreteras deberían adecuarse a los tres principios que se describen a continuación.

Funcionalidad

Una red vial concebida para su seguridad, tiene una estructura jerárquica de carreteras en la que cada nivel desarrolla una función definida. La función asignada a una carretera es de gran importancia y requiere un conocimiento completo del sistema viario, ya que la función teórica asignada a la vía debe coincidir con la función real que desarrolla.

En 1998, Holanda promovió una campaña de recalificación y modificación de sus carreteras para que cada una tuviera una función clara que no diera lugar a ninguna confusión. Según Messer (C. Messer, 2003), la clarificación de las funciones de las carreteras puede reducir hasta un tercio la media de los accidentes de tráfico por kilómetro circulado por cada vehículo.

El programa “Sustainable Road Safety” enmarca las carreteras dentro de tres funciones diferenciadas: la función de dirección, la de distribución y la de acceso. En la figura 2 se muestra un esquema de esta división de funciones dentro de la red de carreteras.

Fig. 2. Categorización de una red de carreteras

Fuente: Sustainable Safety

Las carreteras de dirección (through roads) pertenecen al grupo de las autopistas, autovías y carreteras nacionales. Se caracterizan porque sus movimientos son rápidos e ininterrumpidos. Debido a la alta velocidad a la que se circula, el acceso a estas vías debe estar restringido, las curvas horizontales y verticales deben tener radios generosos, las barreras laterales deben ser colapsables, la mediana tiene que estar presente en todo el tramo de carretera etc. Si se dan estas características, las carreteras de dirección suelen ser las más seguras.

Las carreteras de distribución (distribution roads) son las que unen las carreteras de dirección con las de acceso a las zonas urbanas. Se trata de carreteras regionales que captan tráfico de las áreas residenciales y lo distribuyen hacia las autopistas y autovías. Por su función, estas carreteras suelen conectar vías rápidas con lentas y vice versa. Para que sean seguras, tienen que favorecer que el conductor baje la velocidad del vehículo a tiempo. Es esta categoría de carreteras la que más número de accidentes sufre a lo largo del año y por ello sus elementos de diseño deben que estar bien definidos para evitar los accidentes en la medida de lo posible.

El tercer y último grupo de carreteras son las de acceso (access roads). Tienen como función la de conectar a los vehículos con su destino final: zonas residenciales, comerciales etc. Las carreteras de acceso deben tener límites de velocidad como máximo de 30 Km/h y características tales que agilicen y calmen el tráfico que soportan.

La unión de los tres tipos de carreteras da lugar a la red global de carreteras de un país.

Desde el punto de vista de esta filosofía, tener en cuenta las distintas funciones que tienen las carreteras y definir entre ellas una estructura jerárquica supone un paso importante hacia la mejora de la seguridad vial.

A día de hoy, muchas de las carreteras son multifuncionales (desarrollan varias funciones al mismo tiempo) y son utilizadas por vehículos distintos con grandes diferencias de velocidad, masa y grado de protección. Esto va en contra de la propia seguridad de los usuarios y se necesita aplicar medidas correctoras para evitar conflictos como estos.

Los requisitos de funcionalidad de una carretera son cuatro y se nombran a continuación:

- Eliminación de cualquier tipo de multifuncionalidad en las carreteras y adaptación a la monofuncionalidad (carreteras únicamente de dirección, de distribución o de acceso).
- Minimización del tiempo de viaje que transcurre por carreteras inseguras.
- Los trayectos por carretera deben ser lo más breves posibles.
- El camino más corto y la carretera más segura deben coincidir.

Más adelante se incluyen fotografías de las tres categorías de carreteras y en una tabla se describen sus elementos de diseño.

Homogeneidad

La homogeneidad parte de la evidencia de que los tramos homogéneos son los más seguros en las carreteras, considerando el número de accidentes por kilómetro circulado. De hecho, son las autopistas las carreteras más seguras, ya que las diferencias en velocidad, masa y dirección de los vehículos son mínimas. Por lo contrario, las carreteras de distribución, en las que hay vehículos que circulan a velocidades relativamente altas mientras que otros no, grandes diferencias en las masas de los vehículos y un gran número de intersecciones se enmarcan dentro de las carreteras más peligrosas.

Los requisitos de la homogeneidad son el resultado de un análisis exhaustivo de los accidentes. Básicamente, son requisitos que se centran en imposibilitar los accidentes impidiendo o minimizando los posibles conflictos en las carreteras. Estos son:

- Mayor control de los movimientos de tráfico (señales de tráfico, rotondas etc.)
- Separación de los distintos usuarios de la carretera (conductores, ciclistas, peatones) mediante vías especiales como carriles bici, zonas peatonales etc.
- Reducción de la velocidad en puntos conflictivos.

- Evitar obstáculos a lo largo de la carretera.

Predictibilidad

Con el objetivo de prevenir la incertidumbre entre los conductores y de rebajar su carga mental, las carreteras se deben construir y señalizar para que resulte obvio el tipo de conducta esperado en la carretera. Es decir, las carreteras deben ser auto-explicativas. Para ello, el número de categorías de carreteras debe estar limitado y su diseño tiene que ser lo más uniforme posible dentro de cada categoría.

El concepto de las carreteras auto-explicativas es uno de los más importantes dentro del programa de seguridad vial holandés. Se basa en que las carreteras con funciones diferentes (dirección, distribución o acceso) tengan un diseño característico que las haga reconocibles de manera que el conductor sepa intuitivamente cómo debe comportarse. Elementos como la señalización vertical y horizontal, la anchura de los carriles o la iluminación serán diferentes según el tipo de carretera en la que se circule y tendrán la función de dejar una huella característica en la carretera. El diseño de estos elementos siempre debe ser simple y consistente.

Si esto se cumple, los conductores tendrán una mejor idea del tipo de conducción que se espera de ellos, y de la misma manera serán capaces de prever la conducta de los demás conductores o usuarios de la carretera. Una vez en la carretera, los conductores sabrán, por ejemplo, la velocidad a la que deben conducir, si puede haber intersecciones con otras vías al mismo o a diferente nivel o si a los ciclistas les es permitido circular por la carretera.

Los requisitos para el reconocimiento de las carreteras y para su predictibilidad son:

- Evitar la incertidumbre en el comportamiento del conductor mediante un diseño de las carreteras definido y preciso, y una señalización inequívoca.
- Hacer que las diferentes categorías de carreteras sean reconocibles.
- Limitar el número de los elementos de diseño de cada categoría y uniformizarlos.

Hay que destacar, que la limitación del número de categorías de carreteras es de gran ayuda para que estas sean reconocibles rápidamente. Es evidente que será más fácil reconocer una categoría de carretera si en el sistema sólo existen tres tipos de categorías que si hay que reconocerla entre cinco posibles categorías. Como se ha explicado anteriormente, el programa "Road Safety Design" categoriza toda la red de carreteras en tres grupos (carreteras de dirección, distribución y acceso).



Los tres principios descritos en el anteriormente suponen una situación ideal que en ningún lugar (incluso en Holanda) se ha alcanzado. Todos los cambios a efectuar en la red de carreteras para cumplir con los tres principios (funcionalidad, homogeneidad y

predictibilidad) sólo pueden llevarse a cabo gradualmente y, por lo tanto, su aplicación definitiva puede tardar varios años o décadas.

A modo de resumen/ejemplo del apartado anterior, se muestran fotografías de las tres categorías de carreteras distinguidas según su funcionalidad y se especifican sus elementos de diseño. Estos elementos de diseño cumplen con los principios de homogeneidad y predictibilidad descritos anteriormente. Cada categoría de carretera se divide en dos subtipos con características similares.



Carreteras de dirección:

Fig. 3. Autopista y carretera principal pertenecientes a la categoría de carreteras de dirección.

Type I: motorway (freeway)		Type II: motor road (trunk road)	
			
Elementos de diseño	Velocidad límite: 100 -120 Km/h	Velocidad límite: 100 Km/h	
	Velocidad de proyecto: 120 Km/h	Velocidad de proyecto: 100 Km/h	
	Intersecciones a distinto nivel	Intersecciones a distinto nivel	
	Calzadas físicamente separadas	Calzadas físicamente separadas	
	2 carriles en cada calzada como mínimo	1 o 2 carriles en cada calzada	
	Carril de emergencia	Carril de servio y/o calzada semipavimentada	
	Señalización continua	Señalización continua	

Carreteras de distribución:

Fig. 4. Calzada doble y calzada simple pertenecientes a la categoría de carreteras de distribución

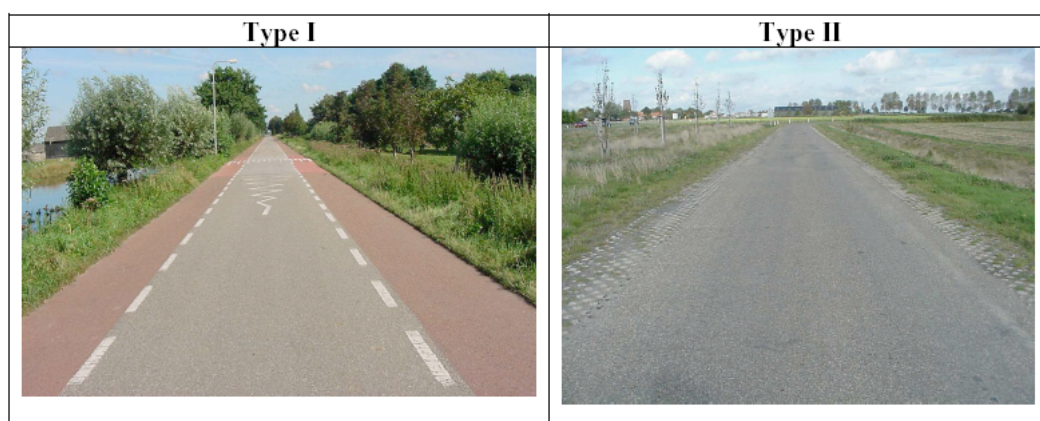
Type I: dual carriageway	Type II: single carriageway
	

Elementos de diseño	Velocidad límite: 80 Km/h	Velocidad límite: 80 Km/h
	Velocidad de proyecto: 80 Km/h	Velocidad de proyecto: 80 Km/h
	Intersecciones con rotondas o semáforos prioritarios	Intersecciones con rotondas que obligan a reducir la velocidad
	Conexiones limitadas a carreteras secundarias	Conexiones limitadas a carreteras secundarias
	2 carriles por sentido de circulación	1 carril por sentido de circulación
	Carril paralelo para ciclistas y peatones	Carril paralelo para ciclistas y peatones

Fuente: Road Safety Design

Carreteras de acceso:

Fig. 5. Los dos tipos de vías pertenecientes a la categoría de carreteras de acceso



Elementos de diseño	Velocidad límite: 30 Km/h	Velocidad límite: 30 Km/h
	Velocidad de proyecto: 60 Km/h	Velocidad de proyecto: 60 Km/h
	Carril con separación entre conductores y ciclistas	Único carril para todos los usuarios
	Cruces prioritarios posibles	Cruces sin prioridad
	Señalización continua	Señalización continua
	Badenes reductores de velocidad	Sin badenes

Fuente: Road Safety Design

2.2.3 La filosofía sueca: Vision Zero

Suecia está ampliamente reconocido como el país líder en seguridad vial, y sus programas de seguridad de vial siempre han marcado tendencias entre los países concienciados con el problema de las muertes en carreteras.

Desde 1977, Suecia basa sus esfuerzos en reducción de muertos y heridos por accidentes de carretera mediante la aplicación del programa “Vision Zero”, una filosofía radical con bases ético-morales que sostiene que nadie debe morir o sufrir heridas de gravedad en las carreteras suecas mientras hace uso de ellas. Este gran fundamento sólo puede llevarse a

cabo si entre los responsables del diseño de las carreteras se tiene en cuenta que los humanos cometen errores al conducir (J. Oxley, 2003).

Este innovador programa de seguridad vial, da una visión diferente del problema de las muertes en las carreteras y proporciona herramientas útiles para abordar la seguridad en las carreteras. “Vision Zero” supone un cambio de mentalidad y estrategia que está dando muy buenos resultados con respecto a la reducción de accidentes y heridos de gravedad en accidentes.

Responsabilidad

“Vision Zero” trata el criterio de responsabilidad con respecto a la seguridad vial de forma totalmente diferente. En la mayoría de los países, existen unas reglas generales que los conductores y usuarios de la carretera deben cumplir para evitar accidentes. Según esta visión clásica, si ocurre un accidente, por lo menos un conductor o usuario de la carretera ha quebrantado, por definición, alguna regla y, por lo tanto, se procede a actuar bajo un sistema legal.

En cambio, el nuevo concepto sueco defiende que la responsabilidad de un accidente se comparte entre el conductor y el conjunto de los planificadores de sistema. Los principios de responsabilidad que sigue “Vision Zero” se pueden resumir en tres puntos:

- los proyectistas de la carretera son siempre los últimos responsables del diseño, operaciones y uso del sistema de transporte por carretera y son, por lo tanto, responsables del nivel de seguridad en el conjunto del sistema.
- los conductores y usuarios de la carretera son responsables del cumplimiento de las normas de circulación.
- si los conductores no cumplen las normas de circulación debido a falta de conocimientos, aceptación o habilidad, los proyectistas tienen que actuar para evitar que alguien muera o sufra heridas de gravedad.

Seguridad y movilidad

Según la filosofía de este programa, la pérdida de seres humanos y las lesiones graves son inaceptables dentro del sistema de transporte y, por lo tanto, el sistema se debe proyectar de manera que los accidentes no ocurran. Esto implica que la seguridad adquiere un peso mucho más importante que cualquier otro dentro del sistema de transporte de carreteras. Siguiendo este planteamiento, la movilidad debería ser una etapa posterior a la seguridad y nunca se tiene que obtener a expensas de la seguridad.

Como la seguridad y la movilidad no pueden tratarse separadamente, la movilidad se convierte en una función de la seguridad y no vice versa. Cuanto más segura sea una

carretera, mayor movilidad (velocidad) será posible. De hecho, “Vision Zero” considera la velocidad como una definición operacional de la seguridad. En consecuencia, según este programa sueco, la velocidad debe limitarse a un valor que esté en acuerdo con la propia seguridad de la carretera. Esto supone un cambio de punto de vista que contrasta con la visión clásica del problema, en el que la velocidad en la carretera se adopta más bien siguiendo criterios técnicos que los propios relacionados con la seguridad.

Estrategia y aplicación

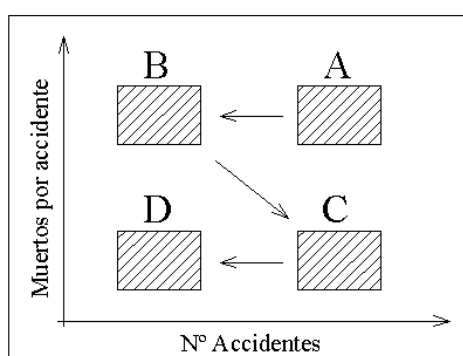
Uno de los principios más importantes de esta filosofía es que ningún accidente debe originar una severidad tal que esté por encima de la propia tolerancia humana, de manera que no se produzcan lesiones graves en los conductores o usuarios de la carretera.

El riesgo a sufrir heridas de gravedad o la propia muerte se puede tratar como una función donde las lesiones dependen de las fuerzas mecánicas originadas en un accidente. Si las fuerzas mecánicas pudieran mantenerse bajo el umbral límite de las lesiones de gravedad, se obtendría virtualmente un sistema seguro. Para mantener la exposición de un accidente bajo este límite, podemos o bien evitar todos aquellos accidentes que se encuentren por encima del umbral, o bien aumentar la capacidad de soportar las fuerzas mecánicas (prevención de accidentes o prevención de lesiones).

Tradicionalmente, la prevención de accidentes ha sido la única metodología seguida por las administraciones en sus programas de seguridad vial. Como la eliminación de todos los accidentes que superan el umbral es imposible, “Vision Zero” implementa, además, la prevención de lesiones en su programa. Es decir, intenta modificar la fuerza mecánica originada en un accidente para que ésta esté dentro de la tolerancia humana. A modo de ejemplo, “Vision Zero” considera que una intersección segura no es aquella en la que no se producen accidentes, sino aquella en la que ningún posible accidente causa heridas graves o la propia muerte.

A raíz de este ejemplo, se ha introducido un concepto conocido entre los especialistas en seguridad vial, que es el cuadro de las cuatro etapas:

Fig. 6. Diagrama de las 4 etapas



Fuente: Elaboración propia

Las letras A, B, C y D indican la secuencia lógica a seguir para la reducción de accidentes y muertos en los accidentes de tráfico. Lo más relevante del cuadro es el paso del nivel B al nivel C: es preferible que se produzcan muchos accidentes no dañinos (nivel C) que pocos accidentes peligrosos y con muertos (nivel B), cosa que justifica el ejemplo del párrafo anterior.

Implicaciones en la velocidad

La adaptación de las fuerzas mecánicas que se producen en un accidente para que no superen el umbral tolerable por los humanos requiere un conocimiento básico de la relación velocidad-mortalidad en las colisiones.

Por ejemplo, la tolerancia de un peatón frente a un impacto contra un coche bien diseñado (con parachoques flexibles y chapas deformables) es aproximadamente de 30 Km/h. Si en una zona urbana se quiere desarrollar una velocidad mayor, se deben separar los cruces de peatones del tráfico general. Si no se actúa así, la velocidad máxima en tramos urbanos debe reducirse a un valor de 30 Km/h.

Análogamente, los mismos argumentos se pueden utilizar en tramos donde únicamente pueden colisionar coches. Se ha podido demostrar en pruebas de choque realizadas por los biomecánicos de Peugeot-Renault que la capacidad humana para resistir un impacto frontal entre coches bien diseñados se alcanza a una velocidad de 70 Km/h. En impactos laterales, esta velocidad baja hasta un valor de 50 Km/h. Por lo tanto, si se quieren desarrollar velocidades mayores (por ejemplo 100 Km/h), la infraestructura deberá estar diseñada de manera que imposibilite los impactos frontales (medianas) y los laterales (intersecciones a distinto nivel).

En la tabla 2 se detalla la velocidad máxima tolerable por los humanos para diferentes casos:

Tabla 2. *Velocidad máxima tolerable por un humano ante una colisión*

Infraestructura y tráfico	Velocidad segura (Km/h)
Zonas urbanas con posibles conflictos entre peatones y coches	≤ 30
Intersecciones con riesgo de accidentes laterales	≤ 50
Carreteras con riesgo de accidentes frontales (sin mediana)	≤ 70
Carreteras sin posibilidad de impactos frontales o laterales (únicamente impactos contra la infraestructura)	≥100

Fuente: European Road Safety Observatory

Cabe destacar que el éxito de esta estrategia también depende de un cierto desarrollo de la seguridad dentro de los vehículos y que se asume que los conductores se comportan adecuadamente.

2.3 EURORAP

2.3.1 Introducción y objetivos

El proyecto EuroRAP (“European Road Assessment Programme”) o Programa de Valoración de la Seguridad en las Carreteras Europeas, parte de la filosofía desarrollada por la administración sueca de carreteras conocida como “Vision Zero” y también utiliza conceptos del programa holandés “Road Safety Design”. Lo que se pretende es que exista un sistema de transporte por carretera libre de consecuencias graves para la salud de las personas y por tanto pone énfasis en los roles a desarrollar por los diferentes actores que tienen relación con el sistema de transporte por carretera.

EuroRAP es un proyecto hermano al EuroNCAP (programa de evaluación de la seguridad de los vehículos) que busca aplicar los mismos principios, pero en vez de asignar estrellas a los vehículos, otorga estrellas a las secciones de carretera según sus características y su riesgo asociado. Este proyecto de valoración de la seguridad en las carreteras, fue promovido en el 2001 por el Automóvil Club Inglés (AA) y actualmente cuenta con la participación de los clubes de automóviles más importantes a nivel europeo, de las administraciones públicas de carreteras de varios países (Gran Bretaña, Holanda, Suecia, Francia, Suiza, Austria, Irlanda, España, Alemania e Italia), y de la dirección del TRL (Centro de investigación en transporte de Inglaterra) y además está subvencionado parcialmente por la Comunidad Europea (CE).

La creación y aplicación de EuroRAP responde a un objetivo fundamental: mejorar la seguridad de las carreteras y reducir el riesgo de accidentes. Para ello, EuroRAP tiene como objetivos derivados:

- desarrollar un programa sistemático de valoración del riesgo de las carreteras que identifique los defectos más importantes de seguridad vial que pueden ser mejorados con medidas prácticas.
- asegurar que la valoración del riesgo se encuentra en el corazón de las decisiones estratégicas de mejora de las carreteras y calles, de protección en caso de choque y de los estándares de gestión de las vías.

Para alcanzar sus objetivos, Eurorap utiliza dos protocolos. El primero se encarga de medir y mapear los ratios de seguridad de las vías, y el segundo sirve para inspeccionar carreteras en Europa y poder examinar cómo protegen al usuario cuando se produce un accidente, en especial cómo protegen al usuario de sufrir heridas graves o de morir.

En estos momentos el programa se concentra en carreteras interurbanas debido a que un gran porcentaje de mortalidad se da en ellas, pero en un futuro se pretende ampliar el análisis a las zonas urbanas. La intención es hacer un ranking de las carreteras en función del riesgo a morir o quedar herido grave y poner de manifiesto qué actuaciones podrían reducir la probabilidad de sufrir una colisión y que si dicha colisión se produce las consecuencias no sean graves para la salud.

2.3.2 Agentes implicados

Los resultados derivados del estudio EuroRAP son una información valiosa para los distintos agentes implicados en la gestión y uso de las infraestructuras viarias. Los principales beneficiarios de las conclusiones aportadas por son, en dicho sentido, los responsables de la red vial de un país, ya que pueden realizar un seguimiento sistemático y detallado de la accidentalidad de cada tramo de carretera, establecer comparaciones entre las vías de la misma tipología, y comprobar, a corto, medio y largo plazo, las mejoras implantadas en los tramos con mayor riesgo de accidente.

Por otro lado, también hay que incluir en el grupo de agentes implicados a los propios usuarios de las vías, ya que EuroRAP permite comprender de qué modo las infraestructuras de la carretera pueden mejorar la seguridad vial. Por lo tanto, a medida en que se den a conocer los resultados del estudio, el usuario conocerá el nivel de riesgo asociado a una carretera y sabrá cómo debe adaptar su conducción en cada tramo de la carretera.

2.3.3 Metodología

EuroRAP cuenta actualmente con dos protocolos de actuación, el índice de riesgo y el Road Protection Score (RPS).

El índice de riesgo mide la probabilidad de sufrir un accidente mortal o con heridos graves según la longitud del tramo y la intensidad del tráfico. El segundo protocolo, el RPS, puntúa la seguridad que ofrecen los diferentes tramos de las carreteras; el objetivo no es valorar la bondad de la vía, sino las ventajas de la vía para evitar las incidencias mortales o graves cuando el accidente ya es inevitable (seguridad pasiva).

En una fase previa al desarrollo de los dos protocolos, se efectúa una tramificación de la carretera a analizar. La tramificación consiste en dividir la carretera en tramos con características parecidas para simplificar el análisis de la carretera. Los tramos se escogen siguiendo criterios de homogeneidad: intensidad constante o con pequeñas variaciones a lo largo del tramo, características físicas de la vía (anchura y número de carriles, límite de velocidad genérico, número de intersecciones, características de la mediana etc.) constantes y distancia de cada tramo similar (de 20 a 30 Km) a lo largo del tramo.

2.3.3.1 Protocolo 1. Índice de riesgo

El protocolo de Índice de Riesgo del riesgo clasifica los tramos de carretera según su riesgo a sufrir accidentes mortales o que impliquen lesiones de gravedad. Lo que se pretende es hacer una radiografía de lo que está sucediendo en la actualidad en una red de carreteras.

Como datos iniciales, se parte de las estadísticas de muertes y heridos graves en estos tramos de carreteras y de la IMD asociada los tramos. Para el cómputo de heridos graves se consideran aquellos que han sufrido una hospitalización superior a 24 horas, y para el de muertos se tienen en cuenta las personas muertas hasta 30 días después del accidente.

A partir de estos datos se calculan dos índices de riesgo (IR): los de riesgo colectivo, que muestran la densidad o el número de accidentes mortales y graves por kilómetro de tramo, y los de riesgo individual, que muestran el índice de accidentes mortales y graves en función de la IMD y de los kilómetros del tramo. El riesgo colectivo da una aproximación al número de vidas que pueden salvarse, mientras que el individual pone de manifiesto aquellas vías que tienen un índice de accidentalidad anormalmente alto. Matemáticamente, los índices de riesgo de cada tramo se formulan como:

$$\text{Riesgo colectivo} = \text{número de accidentes/km del tramo} \quad (1)$$

$$\text{Riesgo individual} = (\text{número de accidentes/km del tramo}) \cdot \text{IMD} \quad (2)$$

Aquellos tramos con mayor índice de riesgo se considerarán como los más peligrosos. Una vez obtenidos los valores de IR, los diferentes tramos se identifican con un rango de colores en función de su peligrosidad (desde el verde para los tramos seguros hasta el negro para los tramos peligrosos).

El resultado final, son una serie de listados y mapas que permiten determinar visualmente aquellos tramos con mayor o menor probabilidad de sufrir accidentes de gravedad o de morir.

En la figura 7 se muestra el mapa de riesgo individual en las carreteras españolas para el año 2007:

Fig. 7. Mapa de riesgo individual del 2007 aplicado a España por EuroRAP



Fuente: Fundación RACC

De el análisis de estos mapas, se comprueba que existen tramos donde el riesgo a morir o quedar herido grave es 10 veces superior a otro tramos. La identificación de estos tramos supone un primer paso para solucionar los problemas de seguridad vial asociados a nuestras carreteras.

2.3.3.2 Protocolo 2: RPS (Road Protection Score)

Además del protocolo de asignación del índice de riesgo en la red viaria, EuroRAP tiene un segundo protocolo de inspección y puntuación de seguridad en el diseño, el Road Protection Scoreo RPS.

Mediante este protocolo se puntúa la seguridad que ofrecen los distintos tramos de las carreteras con relación a cuatro elementos fundamentales: la mediana, las intersecciones, las salidas de vía y la gestión de la movilidad de peatones y ciclistas. El objetivo del RPS no es valorar la bondad de la vía para prevenir un accidente (seguridad activa), sino los elementos de protección de la vía para evitar los percances mortales o graves cuando el accidente ya sea inevitable (seguridad pasiva).

En la determinación del RPS se consideran las siguientes premisas:

- El conductor no sobrepasa el límite de velocidad establecido en la vía.
- El conductor se encuentra sobrio.
- El conductor conduce un vehículo seguro (4 estrellas EuroNCAP).
- Los pasajeros del vehículo utilizan el cinturón de seguridad.
- El protocolo compara distintos niveles de riesgo, no una situación de riesgo determinada.

Además, el RPS considera que los principales factores de severidad del accidente (consecuencias) sean identificables y no den lugar a malas interpretaciones por parte de los inspectores de carreteras; que estén relacionados con aspectos relativos al diseño de las vías y que puedan ser tratados en el ámbito de la ingeniería vial, y que identifiquen diferencias en la calidad general de una ruta en lugar de cambios de diseño en puntos específicos.

Los elementos que se valoran son los que comprenden el 80% de las muertes en las carreteras europeas. Son los siguientes:

- Colisiones frontales/adelantamientos.
- Salidas de vía.
- Accidentes en intersecciones.
- Accidentes con ciclistas y peatones.

El último gran grupo (20% restante) comprende a los llamados “alcances” o impactos traseros, y no es considerado porque se interpreta que se trata de una consecuencia del tráfico y que no existen elementos en la vía que nos protejan de ellos.

Dado que el diseño no es el único responsable de los accidentes, se incorpora un “modificador” para cada tipo de percance. Por ejemplo, la intensidad de tráfico –la cual ejerce una influencia directa en el caso de colisiones frontales ya que se producen más adelantamientos–, la anchura del arcén, el porcentaje de vehículos pesados, etc. Todos estos elementos son modificadores siempre y cuando aparezcan de forma homogénea a lo largo de todo el tramo estudiado. En caso contrario, influirán en la medida que estén presentes en todo el tramo (porcentaje de la longitud del tramo donde esté activo el modificador).

Todos los elementos relacionados con los tipos de accidentes especificados se valoran teniendo en cuenta el límite de velocidad de la vía, ya que un determinado diseño de

carretera puede ser apropiado para una velocidad de 50 km/h pero no para una con límite de velocidad de 120 km/h. El RPS no se contrasta con las velocidades reales de circulación, ya que EuroRAP se aplica considerando que los conductores cumplen las normas vigentes para cada tramo.

Elementos de seguridad y tipología de accidentes

Debido a la complejidad que supone iniciar el análisis sobre el riesgo de los elementos de seguridad pasiva de la carretera, se ha considerado un planteamiento basado en la evaluación de los elementos que intervienen en cada una de las tres tipologías principales de accidente: colisión frontal, salida de vía y choque en intersección.

RPS considera los elementos que influyen en cada tipología de accidente y en sus consecuencias. La metodología no sólo tiene en cuenta la presencia o ausencia de dichos elementos, sino también la eficacia de cada una de las soluciones adoptadas en la vía. En las tres tablas siguientes se detallan los elementos considerados por el protocolo RPS en cada tipología de accidente.

Tabla 3. Elementos de la vía considerados por RPS en colisiones frontales

ELEMENTO RPS	TIPOLOGÍAS
BARRERAS	Barrera homologada por el CEN*. Barrera no homologada por el CEN*.
MEDIANA (anchura medida desde el límite del carril, incluyendo el arcén)	Entre 1 y 3,99 m. Entre 4 y 9,99 m. Anchura superior a 10 m.
EN AUSENCIA DE MEDIANA	Banda sonora de un mínimo de 1 m de ancho (superficie pavimentada, marcada con una banda sonora que alerta a los conductores que se salen del carril). Señalización horizontal de un mínimo de 1 m de ancho (superficie pavimentada con marcas regulares). Doble línea central (que no está permitido cruzar). Única línea central (que está permitido cruzar).

* Comité Europeo de Normalización

Fuente: Fundación RACC

Tabla 4. Elementos de la vía considerados por RPS en salidas de vía

ELEMENTO RPS	TIPOLOGÍAS
BARRERA	Barrera homologada por el CEN*.
DESMONTE > 1 M	Desmante o terraplén superior a 2 m de profundidad o altura (calzadas situadas en un nivel inferior al nivel del suelo circundante. Terraplenes de un mínimo de 2 m de alto que actúan como barreras redirigiendo a los vehículos que se salen de la vía).
ZONA DE SEGURIDAD (anchura medida desde el límite del carril, incluyendo el arcén)	Despeje lateral de 0-0,99 m. Despeje lateral de 1 a 3,99 m. Despeje lateral de 4 a 9,99 m. Despeje lateral superior a 10 m.
BORDILLO	Puede redirigir a los vehículos que se salen de la vía.

* Comité Europeo de Normalización

Fuente: Fundación RACC

Tabla 5. Elementos de la vía considerados por RPS en intersecciones

ELEMENTO RPS	TIPOLOGÍAS
CRUCE DE 4 BRAZOS (con regulación de prioridad en los dos brazos menores)	Sin carril de giro a la izquierda. Cruce con carril de giro a la izquierda.
CRUCE EN FORMA DE T	Sin carril de giro a la izquierda. Cruce con carril de giro a la izquierda.
ROTONDA	Rotonda alta velocidad (en la que los vehículos pueden mantener velocidades superiores a 30 km/h). Rotonda baja velocidad (en la que, debido a sus características, obliga a una reducción de la velocidad hasta aproximadamente 30 km/h).
CRUCE SEÑALIZADO	Cruce, también cruce en forma de T, provisto de semáforos.
CARRILES DE ACELERACIÓN (maniobras de incorporación)	Carriles de aceleración largos (un carril de aceleración largo se define como aquel carril que permite a los vehículos que se incorporan, acelerar hasta el límite máximo de velocidad antes de incorporarse). Carriles de aceleración cortos (un carril de aceleración corto no permite acelerar hasta el límite máximo de velocidad antes de incorporarse). Sin carril de incorporación (los carriles de aceleración se conectan directamente a las calzadas de las carreteras principales, y no hay posibilidad de aceleración).
ACCESOS	Accesos a edificios, propiedades privadas o áreas de descanso.

Fuente: Fundación RACC

Evaluación de los niveles de protección

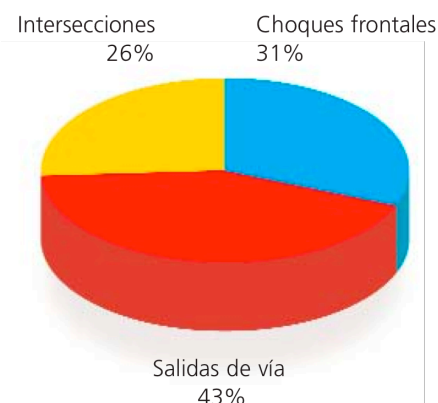
La evaluación de la seguridad pasiva asociada a cada tipología de accidente se realiza asignando estrellas a cada tramo. Cuanto mejor sea el resultado, mayor número de estrellas se le asignará al tramo de estudio. La puntuación puede variar entre una estrella como mínimo hasta un máximo de cuatro estrellas.

La seguridad que ofrecen los elementos de protección para cada tipología de accidente se evalúan en función de la velocidad de circulación. A mayor velocidad, se exigirá una mejor protección para obtener una buena puntuación.

Al final, se calcula para cada tipología de accidente el número de estrellas que le corresponde. Las tablas utilizadas para este cálculo se pueden consultar en el anejo 1.

Una vez calculados los resultados para cada tipo de accidente, se realiza una ponderación final para obtener un indicador global (también basado en un número de estrellas) de protección pasiva. La distribución del peso de los factores se basa en la distribución de los tres tipos de accidentes. El peso de cada accidente está basado en la de accidentes con muertos y heridos de gravedad que tienen lugar en las carreteras europeas. Para poder comparar las distintas carreteras, parece apropiado elegir una distribución de este tipo:

Distribución de tipos de accidentes en Europa (datos de base utilizados para la ponderación final)



Valor final (número de estrellas)

Número de estrellas en las colisiones frontales $\times 0,31 = X$
 Número de estrellas en las salidas de vía $\times 0,43 = Y$
 Número de estrellas en las intersecciones $\times 0,26 = Z$

$X + Y + Z =$ número final de estrellas
 (redondeo matemático)

2.3.4 Expansión de EuroRAP

Desde la creación de EuroRAP en el año 2001, muchos países se han interesado por este programa y lo han adaptado a su propio sistema de carreteras. De esta manera nacieron AusRAP (Australia) y UsRAP (Estados Unidos) en el año 2004, que se sirven de metodologías similares a las utilizadas en EuroRAP.

Fruto del éxito de los tres programas nombrados, se ha creado Irap (International road assessment programme). Irap es un programa promovido por el Banco Mundial que aplica protocolos parecidos a los utilizados en Eurorap optimizados para países en vías de desarrollo. Actualmente, Irap está llevando a cabo campañas de inspecciones de carreteras en Sudáfrica, Malasia, Costa Rica y Chile.

2.3.5 Conclusiones

Dado su planteamiento innovador y su carácter diferente, el proyecto EuroRAP supone una nueva metodología para afrontar el problema de la mortalidad en las carreteras europeas. La aplicación de sus dos protocolos de una manera continuada en el tiempo permitirá enfocar el problema de la seguridad vial a la reducción de muertos y heridos graves de una manera cuantificada. Así, se deberán definir planes de actuación que permitan la mejora de la seguridad de las vías para los usuarios, intentando que todas las carreteras acaben siendo con el paso de los años carreteras de cuatro estrellas.

El proyecto EuroRAP tiene un margen de maniobra, ya que se puede focalizar en primer lugar en las carreteras de alto riesgo para después aplicarse a carreteras con riesgo menor.

Para los usuarios EuroRAP, los resultados del programa permitirán entender mejor la seguridad vial de las carreteras y cómo varía según los diferentes estándares de la vía y tipos de vía. Es de prever que los usuarios, al estar mejor informados del riesgo asociado a cada carretera, acepten mejor las leyes de tráfico (como por ejemplo los límites de velocidad) y adapten más su conducción para disminuir el riesgo de sufrir un accidente.

Por lo que respecta a las autoridades, planificadores e ingenieros, podrán saber cómo están funcionando desde el punto de vista de la seguridad vial aquellas carreteras que gestionan comparadas con otras administraciones u otros países. Por tanto, permitirá determinar cómo están funcionando las mejores prácticas. EuroRAP pretende enfocar actuaciones masivas como la colocación de barreras de seguridad en toda una carretera, que se pueden implementar de manera rápida, y también pretende servir de guía cuando se plantee la mejora de una carretera o la construcción de una nueva.

El programa EuroRAP tiene aún un largo recorrido para mejorar las carreteras y posteriormente entrar en las calles principales de las ciudades. Por otro lado, cada año se van incorporando nuevos países, lo que significa nuevos retos para el programa.

3 EVALUACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIARIA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se propone una metodología para obtener dos indicadores de seguridad asociados a la infraestructura de la carretera. El primero, llamado índice de riesgo (I_R) evalúa los factores activos de la vía mientras que el segundo, el índice de gravedad (I_G), examina los factores pasivos.

Los factores de seguridad activa se refieren a todos aquellos elementos que incorpora la carretera para evitar que se produzcan accidentes (trazado, asfalto, arcones, señalización, etc.). En cambio, los de seguridad pasiva consideran las medidas que incorpora la carretera para minimizar la gravedad de un accidente en caso de que ocurra (medianas, barreras de seguridad, zona de despeje lateral, etc.). Ambos indicadores, por lo tanto, evalúan aspectos totalmente distintos de la infraestructura y no tienen en cuenta las condiciones de tráfico de la carretera.

Por otra parte, los dos se han desarrollado basándose en una tipología concreta de accidente: la salida de vía. La elección de este tipo de accidente se justifica en el apartado 1.4. Hay que destacar que I_R e I_G se obtienen sobre secciones o tramos concretos de una carretera. Es decir, previo a la aplicación del modelo de cálculo, la carretera que quiera ser analizada deberá ser tramificada en varias secciones. Luego se aplicará el cálculo propuesto a cada uno de los tramos o secciones y se obtendrán unos resultados finales. Los criterios de tramificación son los mismos que los descritos en el apartado 2.3.3.

El presente capítulo se divide en dos partes diferenciadas. En la primera se dan a conocer los criterios y la metodología propuesta para obtener el índice de riesgo I_R . En la segunda, se explica la metodología para el cálculo del índice de gravedad I_G .

Por último, cabe mencionar que los dos indicadores calculados supondrán el punto de partida para proponer una revisión de la velocidad límite en el siguiente capítulo.

3.2 DETERMINACIÓN DEL INDICADOR DE RIESGO I_R

A lo largo de este apartado se desarrolla una metodología para obtener el indicador de riesgo I_R . Éste depende de las características del tramo analizado y de la velocidad de circulación. Su cálculo se realiza, fundamentalmente, a partir de tres indicadores parciales de riesgo, que son:

- δ_1 : Índice de riesgo relativo a las características de las curvas.
- δ_2 : Índice de riesgo relativo a las dimensiones de la plataforma.
- δ_3 : Índice de riesgo relativo al estado del pavimento.

Se ha considerado que estos tres indicadores conforman los grandes bloques sobre los que se estructuran los elementos de la infraestructura viaria. Otros factores como la visibilidad, la señalización o la pendiente de la carretera no se tratan dentro de estos indicadores parciales pero sí tendrán un papel importante más adelante.

En una fase final del apartado, se unirán los tres indicadores en uno global δ , que después de aplicar un factor correctivo dará lugar a I_R . I_R toma valores entre 0 y 100, siendo 0 una indicación de riesgo nulo y 100 de riesgo máximo.

3.2.1 Soporte matemático

Formalmente, el modelo de cálculo de los indicadores parciales se basa en unas funciones de riesgo Ψ_i para cada δ_i . Estas funciones, que son la esencia del cálculo propuesto, tienen como variable a la velocidad de circulación v .

Las funciones de riesgo Ψ_i son crecientes y se mueven dentro de un rango de valores 0-1. Cuando su valor es nulo ($\Psi=0$), indican que la posibilidad de sufrir un accidente es imposible, mientras que cuando su valor es máximo ($\Psi=1$), se considera que la velocidad de circulación es tan alta que el accidente es inevitable. Matemáticamente:

$$\psi_i = f(v) \quad v \geq 0 \quad ; \quad (f(v_2) - f(v_1)) / (v_2 - v_1) \geq 0 \quad v_2 > v_1 \quad ; \quad R_f = \{0,1\} \quad (3)$$

Es interesante saber que Ψ_i está definida bajo los fundamentos de la lógica difusa (*Fuzzy Set*). Esta lógica utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, aplica conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total (R. Pérez, 2005). Conviene recalcar que lo que es difuso, borroso o impreciso no es la lógica en sí, sino el objeto que estudia: expresa la falta de definición del concepto al que se aplica. En este sentido, la visión que aporta la lógica difusa puede ser muy interesante si se extrapola al ámbito de la seguridad vial y, más concretamente, al cálculo de indicadores que ofrezcan una valoración del riesgo asociado a la velocidad de circulación.

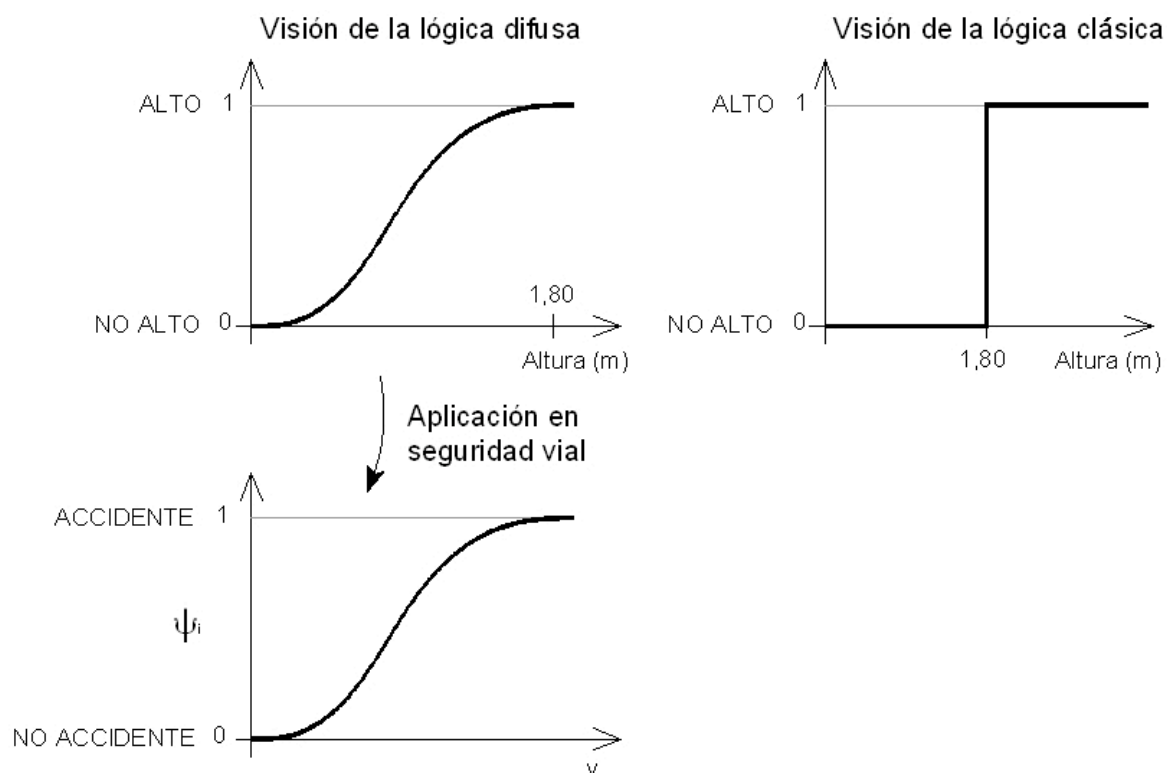
El aspecto central de los sistemas basados en la teoría de la lógica difusa es que, a diferencia de los que se basan en la lógica clásica, tienen la capacidad de reproducir aceptablemente los modos usuales de razonamiento, considerando que la certeza de una proposición es una cuestión de grado. Así pues, sus características más atractivas son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión y su capacidad para modelar problemas no lineales.

El primer ejemplo utilizado para ilustrar el concepto de conjunto difuso fue el conjunto de los “hombres altos”. Según la teoría de la lógica clásica el conjunto “hombres altos” es un conjunto al que pertenecerían los hombres con una estatura mayor a un cierto valor, que podemos establecer en 1,80 metros, por ejemplo, y todos los hombres con una altura inferior

quedarían fuera del conjunto. Así tendríamos que un hombre que mide 1,81 metros de estatura pertenecería al conjunto “hombres altos”, y en cambio un hombre que mida 1,79 metros de altura ya no pertenecería a ese conjunto. Sin embargo, no parece muy lógico decir que un hombre es alto y otro no lo es cuando su altura difiere en dos centímetros. El enfoque de la lógica difusa considera que el conjunto “hombres altos” es un conjunto que no tiene una frontera clara para pertenecer o no pertenecer a él: mediante una función que define la transición de “alto” a “no alto” se asigna a cada valor de altura un grado de pertenencia al conjunto, entre 0 y 1. De la misma manera, la función Ψ_i también define una transición entre la posibilidad de sufrir un accidente o no sufrirlo en función de la velocidad de circulación, la cual cosa permite definir un indicador de riesgo que se mueve entre 0 y 1.

En la figura 8 se muestra gráficamente el razonamiento seguido en el párrafo anterior.

Fig. 8. Lógica clásica versus lógica difusa



Fuente: R. Pérez - Elaboración propia

En la actualidad la lógica difusa se aplica en infinidad de campos, desde los sistemas de frenado ABS en la industria de la automoción hasta en el rendimiento de ascensores o televisores. Todos ellos tienen la particularidad de utilizar información, esencialmente, imprecisa con el fin de lograr sus cometidos.

En esta tesina se aplican por primera vez los fundamentos de la lógica difusa en el ámbito de la seguridad vial.

3.2.2 Evaluación del riesgo en alineaciones curvas (δ_1)

Las curvas son los elementos de trazado de la carretera que presentan una mayor problemática desde el punto de vista de su proyecto, de forma que garanticen una correcta estabilidad de cualquier vehículo que transita por ellas. Este hecho es debido a la peculiar distribución de fuerzas que actúan sobre el vehículo cuando éste aborda este tipo de alineaciones en planta, mucho más crítica que la existente en alineaciones rectas.

En los siguientes subapartados se analizan las condiciones de estabilidad del vehículo en las alineaciones curvas y también se determinan los parámetros que ejercen una mayor influencia sobre ella. A partir de estos parámetros se podrán calcular unos factores de seguridad con los que se propone un indicador del riesgo (δ_1) a sufrir una salida de vía en una curva en función de la velocidad de circulación y del radio de curvatura.

Durante la obtención del indicador se hará uso de la teoría de la lógica difusa. La aplicación de los conceptos de esta teoría simplifican considerablemente el cálculo del indicador.

3.2.2.1 Condiciones de estabilidad

El comportamiento de un vehículo al tomar una curva es, como consecuencia del sistema de fuerzas actuantes sobre el mismo, más inestable que cuando se halla circulando por línea recta. La principal diferencia entre ambas situaciones es la aparición en el primer caso de la fuerza centrífuga; esta fuerza ficticia no es más que consecuencia de la Ley de Inercia (primera ley de Newton), ya que al tomar la curva el vehículo se halla constantemente cambiando su dirección. Para contrarrestar dicho efecto, se dota a la curva de un peralte o inclinación transversal.

Las fuerzas actuantes sobre el vehículo son las siguientes:

- Peso del vehículo (P): Fuerza vertical aplicada en el centro de masas del móvil, c , generada como consecuencia de la acción del campo gravitatorio terrestre. Puede expresarse en función de la aceleración de la gravedad, g , y de la masa del vehículo, m :

$$P = m g \quad (4)$$

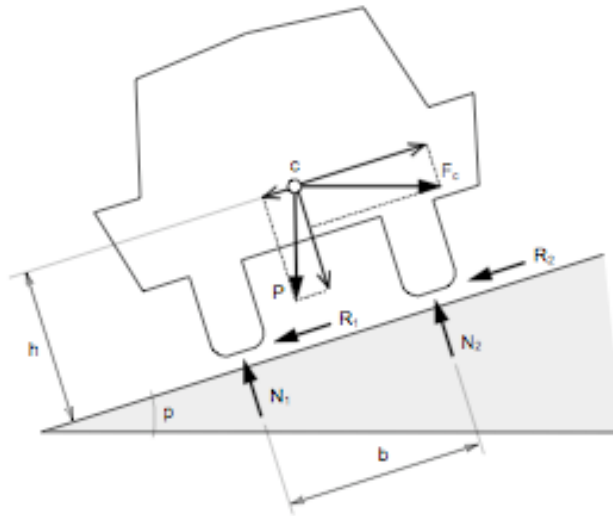
- Fuerza centrífuga (F_c): Provocada por la variación en la dirección del vehículo dentro de la curva circular. Es proporcional a la aceleración normal, a_n , que depende de la velocidad a la que circula el vehículo, v , y del radio r de la curva. Su expresión matemática es la siguiente:

$$F_c = m a_n = m \frac{v^2}{r} \quad (5)$$

- Fuerza de rozamiento (R): Fuerza pasiva producida por el contacto entre neumático y pavimento. Depende de la reacción normal a la superficie de contacto, N , y del coeficiente de resistencia al deslizamiento transversal, f_t . Su expresión matemática es la siguiente:

$$R = f_t N \quad (6)$$

Fig. 9. Diagrama de fuerzas actuantes sobre el vehículo en una curva



Fuente: Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica

En este caso se estudia el movimiento del vehículo en el plano de rodadura, que coincide con la superficie del pavimento en contacto con el neumático. Planteando la ecuación de equilibrio de fuerzas en dicho plano, según el esquema expuesto en la figura 9, se obtiene la siguiente igualdad:

$$F_c = R_1 + R_2 + P \operatorname{sen}(p) \quad (7)$$

Sustituyendo por las correspondientes expresiones equivalentes, anteriormente citadas:

$$m \frac{v^2}{r} = f_t (N_1 + N_2) + m g \operatorname{sen}(p) \quad (8)$$

Teniendo en cuenta que para ángulos pequeños, puede hacerse la aproximación $\operatorname{sen} p = \tan p = p$, por tratarse de infinitésimos equivalentes, y que $\cos p \approx 1$, la anterior expresión queda simplificada:

$$m \frac{v^2}{r} = m g f_t + m g p \quad (9)$$

Cancelando la masa a ambos lados de la ecuación y trasladando el radio al otro miembro, quedará:

$$v^2 = r g (f_t + p) \quad (10)$$

Siendo ésta la condición de equilibrio de fuerzas horizontales en una curva circular.

Por lo tanto, la condición de deslizamiento dependerá de los valores adoptados por el peralte y la velocidad de circulación del vehículo, pudiéndose dar un desplazamiento del vehículo hacia el exterior de la curva, provocado por una velocidad excesiva, por insuficiencia de peralte o por una baja adherencia neumático-pavimento, o por el contrario, un deslizamiento hacia el interior de la curva, ocasionado normalmente por un peralte excesivamente pronunciado. De ambos casos, el primero es el más común.

Tabla 6. Condiciones de deslizamiento en curvas

Caso	Premisa	Condición de deslizamiento	Causas
Desplazamiento hacia el exterior	$p < \frac{v^2}{gr}$	$v^2 > r g (p + f_t)$	-Velocidad excesiva - Peralte insuficiente - Baja adherencia
Desplazamiento hacia el interior	$p > \frac{v^2}{gr}$	$v^2 < r g (p + f_t)$	- Peralte excesivo - Velocidad baja

Fuente: Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica

Además de la hipótesis de deslizamiento, existe otra que se da con mucha menor frecuencia: la hipótesis de vuelco. Sin entrar en detalles físico-matemáticos, el vuelco de un vehículo tiene lugar cuando el momento producido por las fuerzas desestabilizadoras o volcadoras supera el momento generado por las fuerzas estabilizadoras que sobre él inciden.

El vuelco sólo puede producirse en aquellos supuestos en que el rozamiento movilizado es alto y el vehículo presenta centros de gravedad muy elevados, es decir, si se trata de vehículos pesados en condiciones climáticas favorables, firme seco, con altos valores de coeficiente de resistencia al deslizamiento transversal.

Dado que este estudio no trata los vehículos pesados (con centro de gravedad alto), la hipótesis de vuelco no predominará sobre la de deslizamiento y, por lo tanto, no se considera dentro de la metodología de cálculo.

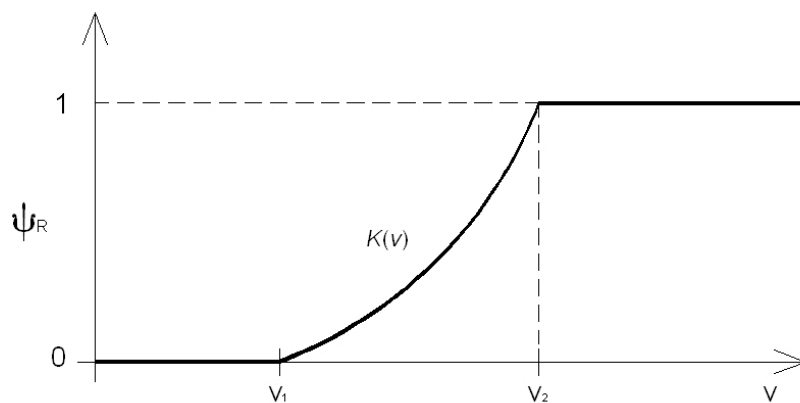
3.2.2.2 Criterios adoptados

Para evaluar la seguridad que ofrece una curva de un radio determinado al circular por ella a cierta velocidad se plantea una función creciente Ψ que se mueve dentro de un rango 0-1. Para cada radio de curvatura la función es diferente y su variable es la velocidad de circulación. Matemáticamente, se define como:

$$\Psi_R(v) = \begin{cases} 0 & \text{si } v < v_1 \\ K(v) & \text{si } v_1 \leq v \leq v_2 \\ 1 & \text{si } v_2 < v \end{cases} \quad (11)$$

Cuando $\Psi = 0$ se supone que la velocidad a la que se circula no implica riesgo alguno de accidente por salida de vía. En cambio, cuando $\Psi = 1$ se considera que el riesgo es máximo y que, por lo tanto, la posibilidad de salirse de la curva es muy alta debido a una velocidad excesiva. Gráficamente, la función se representa tal como se muestra en la figura 10.

Fig. 10. Función Ψ para un radio concreto



Fuente: Elaboración propia

Los valores de v_1 y v_2 son respectivamente las velocidades de inicio de riesgo y de máximo riesgo de la función. Cada radio de curvatura tiene asociado una pareja distinta (v_1, v_2) . Es decir, la función Ψ es diferente para cada radio de curvatura. Es lógico pensar que a medida que aumente el radio de curvatura, los valores de v_1 y v_2 también lo hagan ya que las velocidades que se podrán desarrollar serán mayores.

La esencia del problema consiste en encontrar una formulación adecuada para obtener tanto v_1 como v_2 . En este estudio, se ha considerado que v_1 debería depender de la “dificultad” que le supone al conductor trazar la curva mientras que v_2 se debería focalizar en el deslizamiento del neumático sobre el pavimento. A continuación se describe esta formulación y los criterios físicos en los que se ha basado así como la tendencia de la función $K(v)$.

Determinación de v_1

El valor de v_1 marca la velocidad a partir de la cual existe riesgo de sufrir una salida de vía debido a una velocidad excesiva. Por debajo de este valor la posibilidad de sufrir un accidente por salida de vía se considera nula.

La determinación de v_1 se ha efectuado haciendo uso del factor de seguridad intrínseco de la curva, β , que determina la proporción de aceleración centrífuga compensada únicamente por el peralte (R. Tomás, 2004). Su expresión matemática queda como:

$$\beta = \frac{gp}{v^2/r} = \frac{gpr}{v^2} \quad (12)$$

De donde se deduce:

$$v = \frac{\sqrt{rgp}}{\sqrt{\beta}} \quad (13)$$

Siendo v la velocidad máxima permitida en dicha alineación, que suele coincidir con la velocidad específica del elemento.

El numerador de la ecuación 13 indica la velocidad v_0 a la que el vehículo podría tomar la curva sin ejercer acción alguna sobre el volante, es decir, sin movilizar rozamiento transversal.

$$\sqrt{rgp} = v_0 = v\sqrt{\beta} \quad (14)$$

Cuanto mayor sea el valor de β (cuanto más cercano a la unidad se sitúe), menor esfuerzo deberá efectuar el conductor para trazar la curva y más cómodo se sentirá éste; el vehículo girará casi sin la ayuda del conductor. En cambio, cuanto menor sea el valor de β mayor esfuerzo y concentración del conductor será requerida al trazar la curva.

Después de realizar un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos por Tomás (R. Tomás, 2004), se ha considerado que circular en una curva a una velocidad que implique un valor de $\beta=0,3$ representa el límite a partir del cual la velocidad de circulación en la curva empieza a resultar molesta para el conductor. Es decir, cuando la velocidad a la que no se moviliza rozamiento sólo implica el 54% de la velocidad de circulación ($\sqrt{0,3} = 0,54$), esta velocidad corresponde a v_1 .

Por lo tanto, substituyendo el valor de $\beta=0,3$ en la ecuación 14, se obtiene la fórmula:

$$v_1 = v_0 / \sqrt{0,3} = \sqrt{rgp/0,3} \quad (15)$$

Llegados a este punto, únicamente falta determinar el valor de v_0 para poder calcular v_1 . El cálculo de v_0 es directo ya que existe una relación entre el peralte y el radio de curvatura definida en la norma 3.1-IC de la actual Instrucción de Carreteras.

$$p = f(r) \quad (16)$$

A continuación, se muestran los valores de p especificados en la normativa española, y que son distintos según la categoría a la que corresponde la carretera.

Tabla 7. Peraltes a adoptar según el radio de curvatura

Categoría 1 Autopistas, autovías, vías rápidas y carreteras C-100		Categoría 2 Carreteras C-80, C-60 y C-40	
r (m)	Peralte (%)	r (m)	Peralte (%)
$250 < r < 700$	$p = 8$	$50 < r < 350$	$p = 7$
$700 < r < 5000$	$p = 8 - 7,3(1 - 700/r)^{1/3}$	$350 < r < 2500$	$p = 7 - 6,08(1 - 350/r)^{1/3}$
$5000 < r < 7500$	$p = 2$	$2500 < r < 3500$	$p = 2$
$7500 < r$	bombeo	$3500 < r$	bombeo

Fuente: Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento

Cabe recordar que los valores de la tabla 7 se deben satisfacer en la totalidad de las carreteras integrantes en cualquier red viaria española.

Una vez conocido el valor de v_0 para un radio de curvatura específico, el cálculo de v_1 es instantáneo. De hecho, el valor de v_1 únicamente depende del radio de curvatura y de la categoría a la que pertenece la carretera.

$$v_1 = g(r, \text{categoría}) \quad (17)$$

En la siguiente tabla se ha calculado el valor de v_1 para diferentes radios representativos de ambas categorías. Lógicamente, a medida que el radio aumenta el valor de v_1 es mayor ya que una mayor velocidad se puede desarrollar en la curva manteniendo el mismo grado de seguridad. Por otra parte, para un mismo radio, los valores de v_1 en la categoría 2 son menores que los de la categoría 1 porque el peralte definido por la normativa también lo es.

Tabla 8. Valores de v_0 y v_1 para varios radios de curvatura característicos

Categoría 1			Categoría 2		
r (m)	v_0 (km/h)	v_1 (km/h)	r (m)	v_0 (km/h)	v_1 (km/h)
250	50,40	92,01	50	21,08	38,49
300	55,21	100,80	65	24,04	43,89
350	59,63	108,87	85	27,49	50,19
400	63,75	116,39	105	30,55	55,78
450	67,62	123,45	130	34,00	62,07
500	71,27	130,13	155	37,12	67,77
550	74,75	136,48	190	41,10	75,04
600	78,08	142,55	225	44,72	81,65

700	84,33	153,97	265	48,54	88,62
800	87,35	159,48	305	52,07	95,07
900	89,26	162,96	350	55,78	101,84
1050	91,29	166,68	410	58,18	106,22
1250	93,36	170,44	485	60,03	109,59
1475	95,22	173,84	570	61,59	112,45
1725	96,94	177,00	670	63,04	115,09

Fuente: Elaboración propia

Determinación de v_2

La v_2 indica la velocidad a la que se produce el deslizamiento del vehículo sobre el plano de rodadura. Se trata de una velocidad crítica que queda determinada por las condiciones de deslizamiento descritas en el apartado 3.2.2.1. Su formulación se deduce de la ecuación 10:

$$v_2 = \sqrt{r g (f_t + p)} \quad (18)$$

Cuando la velocidad sea mayor que el valor de v_2 , se produce obligatoriamente un deslizamiento del vehículo hacia el exterior de la curva que se supone que se transformará en un accidente por salida de vía.

El valor p (peralte) de la ecuación es el que se especifica en la normativa española de carreteras, como se explicó anteriormente en la tabla 7.

Por otra parte, la adopción de un valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento transversal f_t no resulta tan evidente. Se sabe que f_t varía en función de la humedad de pavimento y de su rugosidad. En este estudio se ha simplificado el problema considerando que el pavimento se encuentra en estado seco. De todas maneras, la condición de pavimento húmedo no se deja de lado; se tendrá en cuenta más adelante al evaluar el estado de pavimento de la carretera (concretamente en el apartado 3.2.4).

Considerando entonces que el pavimento está seco, se ha adoptado un valor de $f_t = 0,45$ para ambas categorías. Este valor suele ser el habitual en las carreteras españolas (C. Kraemer, 1999).

Substituyendo los valores de p y f_t descritos dentro de la ecuación 18 obtenemos v_2 de forma instantánea para los distintos valores del radio de curvatura. En la siguiente tabla se han calculado los valores de v_2 para distintos radios representativos de las dos categorías:

Tabla 9. Velocidad crítica (v_2) para distintos radios de curvatura característicos

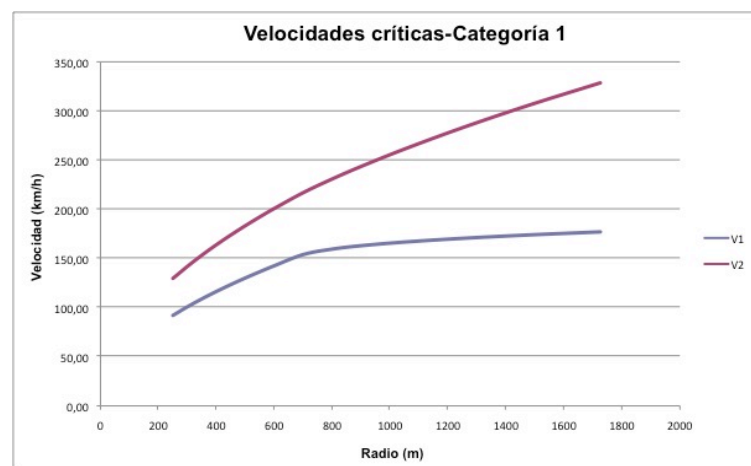
Categoría 1		Categoría 2	
r (m)	v_2 (km/h)	r (m)	v_2 (km/h)
250	129,72	50	57,46
300	142,10	65	65,52
350	153,49	85	74,92
400	164,09	105	83,27

450	174,04		130	92,66
500	183,45		155	101,17
550	192,41		190	112,02
600	200,96		225	121,90
700	217,06		265	132,29
800	230,98		305	141,92
900	243,72		350	152,03
1050	261,42		410	163,76
1250	283,11		485	176,98
1475	305,55		570	190,71
1725	328,61		670	205,58

Fuente: Elaboración propia

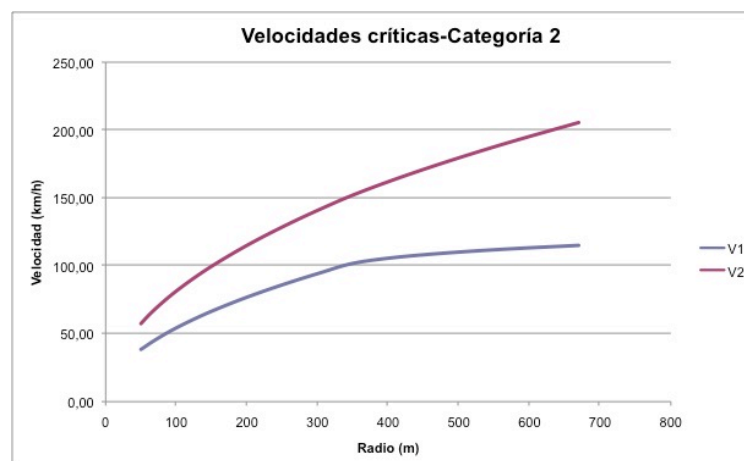
Para tener una visión más gráfica se han dibujado las velocidades críticas v_1 y v_2 en forma de función para ambas categorías:

Fig. 11. Velocidades críticas v_1 y v_2 para la categoría 1



Fuente: Elaboración propia

Fig. 12. Velocidades críticas v_1 y v_2 para la categoría 2



Fuente: Elaboración propia

Tendencia de $K(v)$

Entre los puntos v_1 y v_2 , la curva existente es cuadrática (mirar figura 10). Esta tendencia tiene la siguiente motivación:

Durante la conducción en una alineación curva, si el conductor del vehículo nota que la velocidad a la que circula es demasiado elevada ($v > v_1$), intentará frenar para evitar una posible salida de vía. No obstante, se podría pensar que el conductor tiene la opción de dar un volantazo en vez de pisar el freno, pero esta posibilidad no tiene sentido porque un volantazo a tal velocidad provocaría seguramente un derrape de las ruedas, lo cual no evitaría la temida salida de vía.

Por lo tanto, asumiendo como primera hipótesis que el conductor pisa el freno cuando percibe que la velocidad a la que circula es demasiado elevada, el riesgo a sufrir un accidente por salida de vía será proporcional a la distancia de frenado del vehículo. Cuanto menor sea esta distancia, más posibilidades habrá de frenar el vehículo antes de que se salga de la calzada. Por otra parte, de las leyes de la cinemática, se sabe que la distancia de frenado es proporcional a v^2 .

$$D_f = \frac{v^2}{a} \quad (19)$$

Siendo a la desaceleración del vehículo, valor constante y específico para cada vehículo.

La función $K(v)$ es entonces proporcional a v^2 entre los puntos v_1 y v_2 . La deducción de su expresión matemática es instantánea:

$$K(v) = C (v - v_1)^2 = \frac{1}{(v_2 - v_1)^2} (v - v_1)^2 \quad (20)$$

La adopción de una tendencia cuadrática es común en las gráficas que relacionan la velocidad con los accidentes con heridos en carretera. En la llamada teoría de las potencias, desarrollada por Nilsson (G. Nilsson, 2004), se propone una formulación que da el incremento en accidentes con heridos provocados por un aumento de velocidad en un tramo concreto de carretera. Este incremento en accidentes también es proporcional a v^2 .

$$\frac{A_1}{A_0} = \left(\frac{v_1}{v_0} \right)^2 \quad (21)$$

Donde:

A_1 : accidentes con heridos registrados en el tramo debido a la nueva velocidad v_1 .

A_0 : accidentes con heridos registrados en el tramo con la velocidad inicial v_0 .

v_1 : velocidad nueva del tramo ($v_1 > v_0$).

v_0 : velocidad inicial del tramo.

Aunque la explicación de esta tendencia es diferente en ambos casos (en la teoría de las potencias se hace uso de la energía cinética mientras que aquí se relaciona el riesgo con la distancia de frenado), esta similitud no hace más que corroborar una cierta relación entre el riesgo a sufrir un accidente y la accidentalidad con heridos.

Factores multiplicativos

Hasta ahora, la seguridad que ofrece una curva de un radio determinado se ha medido en función de la velocidad a la que se circula. No obstante, existen otros factores que no dependen directamente de la velocidad de circulación pero que su presencia puede provocar problemas graves de seguridad.

En la literatura, estos factores se conocen como Accident Modification Factors (AMF) y se tratan como elementos que dada su presencia incrementan el riesgo a sufrir un accidente bajo un factor multiplicativo.

Desde los años 90 se han cuantificado diversos AMF's y se han aplicado mayoritariamente en modelos de predicción de accidentes (J. Bonneson, 2005). Su uso ha quedado validado por varias administraciones de carreteras como la americana FHWA (Federal Highway Administration). Para la determinación del indicador de riesgo δ_1 se ha considerado necesario incluir en su cálculo el factor multiplicativo más relevante, que es el de las curvas inesperadas.

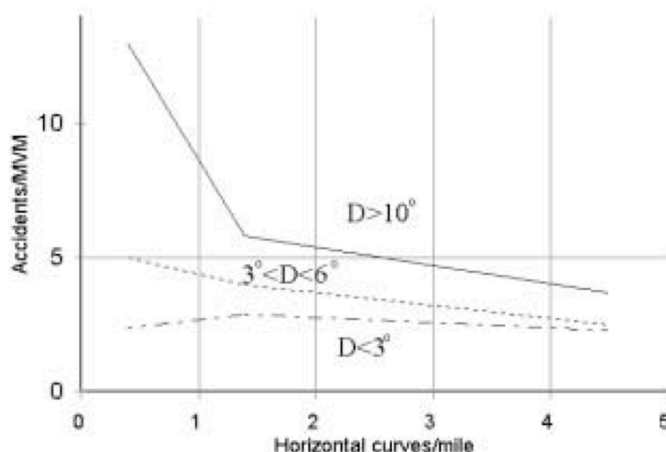
Las curvas inesperadas presentan un grave problema para los conductores. De hecho, en muchas ocasiones, los llamados puntos negros de una carretera (secciones en las que se produce constantemente una acumulación de accidentes) se sitúan en las inmediaciones de una curva que no es fácil de prever.

Estas curvas se suelen encontrar en tramos de alineaciones rectas con poca densidad de giros pero con radios relativamente bajos. Es decir, en tramos con pocas curvas pero cerradas. Dependiendo de la longitud de la recta que precede a la curva y el radio de ésta, la posibilidad de sufrir un accidente variará. Cuanto menor sea el radio de curvatura y más larga la longitud de la recta, el riesgo a sufrir un accidente se incrementará.

La explicación a este fenómeno está ligada directamente con la velocidad del vehículo alcanzada antes de trazar la curva. Las rectas largas inducen a aumentar la velocidad de circulación, de manera que al llegar a una curva que es inesperada se crea una situación peligrosa. Si además, el radio de la curva es relativamente bajo, el peligro se agravará.

Esta reflexión sobre velocidades y accidentalidad en curvas inesperadas ha sido comprobada en varios estudios científicos. De entre todos, el más relevante es el realizado por Baldwin (D.M. Baldwin, 1946):

Fig. 13. *Accidentalidad en función de la densidad de curvas*



Fuente: Baldwin, 1946

El eje de las abscisas representa la cantidad de curvas por milla en una carretera (densidad de curvas). Se puede tratar como una indicación de la longitud media de la recta que precede a la curva. Cuanto menor sea la cantidad de curvas por milla, mayor será esta distancia. En el eje de las ordenadas se da la frecuencia de los accidentes ocurridos en la carretera. De los resultados de la gráfica, se observa que a medida que la densidad de curvas disminuye (más curvas inesperadas), la frecuencia de accidentes aumenta. Además, este aumento es más acusado cuanto mayor sea el grado de las curvas (D). Las curvas con grado elevado suelen corresponderse con radios de curvatura bajos.

La normativa de trazado de la instrucción española de carreteras 3.1-IC del año 1999 ya contempla la existencia de curvas inesperadas y trata de evitarlas. En la normativa se considera que una curva es inesperada cuando se cumplen las siguientes condiciones para las dos posibles categorías de carreteras:

- Categoría 1: curvas con $R < 700$ m precedidas por una recta de longitud $l > 400$ m
- Categoría 2: curvas con $R < 300$ m precedidas por una recta de longitud $l > 400$ m

Actualmente, bajo la aplicación de la vigente instrucción de carreteras, no se permite la construcción de tramos de estas características (el radio se debería aumentar o la recta acortar). No obstante, todavía existen curvas inesperadas dentro de la red de carreteras españolas debido, seguramente, a que fueron construidas aplicando una normativa anterior o a que es físicamente imposible evitarlas.

Se considera, entonces, que una curva es inesperada si cumple con las condiciones descritas en la normativa española. La manera de penalizar la existencia de una o varias curvas de estas características en el tramo de estudio será aplicando un factor correctivo a Ψ . El factor tiene un valor de 1,25. Este orden de magnitud entra en coherencia con los resultados propuestos por Hauer (E. Hauer, 2000 a).

Si, entonces, existe una curva catalogada como inesperada el riesgo a sufrir un accidente aumentará en un 25%. En cualquier caso, el valor de δ_1 siempre estará comprendido entre 0 y 1. Es decir, si la aplicación del factor correctivo ocasiona un aumento tal que el valor del riesgo es superior a la unidad, se limitará el resultado al valor de 1 porque el riesgo nunca puede ser superior al 100%. Matemáticamente:

$$\delta_1 = \min\{1,25\Psi, 1\} \quad (22)$$

Si, en cambio, no existe ninguna curva de estas características (lo más probable) no se aplicará factor multiplicativo alguno.

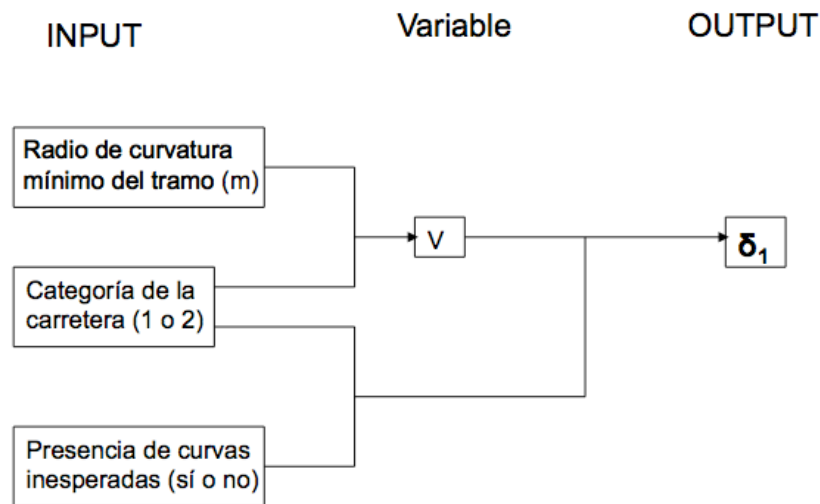
$$\delta_1 = \Psi \quad (23)$$

3.2.2.3 Obtención de δ_1

Una vez definidos los criterios descritos, sólo falta explicar la metodología de cálculo que los engloba a todos.

El cálculo se ha efectuado con la ayuda de una hoja de cálculo. En ella se han incluido las fórmulas matemáticas descritas en los apartados anteriores y se ha programado el cálculo de manera que, introduciendo las características del tramo de carretera a analizar, se obtenga el valor del riesgo a sufrir un accidente por salida de vía en una curva en función de la velocidad de circulación. Este valor de riesgo variará entre 0 y 1. Se muestra a continuación el esquema realizado por la hoja de cálculo:

Fig. 14. Esquema de cálculo



Fuente: Elaboración propia

En el tramo que se esté estudiando existirán varias curvas de radios diferentes. De entre todas se escogerá aquella que dé un resultado más desfavorable, es decir, la de radio menor. Analíticamente:

$$R = \min\{R_i\} \quad ; \quad i = 1, 2 \dots n \quad (n = \text{número de curvas}) \quad (24)$$

De todas maneras, aunque sea el mínimo, este radio puede considerarse como representativo de todo el tramo ya que la tramificación de la carretera se efectúa siguiendo criterios de homogeneidad y, por lo tanto, es de esperar que los radios de las curvas no difieran mucho entre ellos.

Hay que recordar que el resultado final obtenido δ_1 no debe considerarse como una probabilidad de salirse de la vía en el sentido estricto de la palabra, si no más bien como un indicador de la seguridad en las curvas. Cuando mayor sea el valor de δ_1 , más riesgo de salirse de la vía habrá al circular por una curva.

3.2.2.4 Ejemplo de cálculo

En las tablas siguientes se dan los resultados obtenidos en cuanto a δ_1 para varios ejemplos de cálculo aplicando la metodología propuesta sobre unos tramos teóricos.. En las tablas se especifican los inputs descriptivos de cada tramo y también los diferentes valores de la velocidad para los que se calcula el índice de riesgo relativo a las curvas (δ_1).

Tabla 10. Ejemplo de cálculo 1

Riesgo en curvas					
INPUT	Radio (m)	450			
	Categoría	1			
	C.inesperadas	No			
v (km/h)		110	130	150	170
δ_1 (0-1)		0,00	0,02	0,40	1,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Ejemplo de cálculo 2

Riesgo en curvas					
INPUT	Radio (m)	450			
	Categoría	1			
	C.inesperadas	Sí			
v (km/h)		110	130	150	170
δ_1 (0-1)		0,00	0,03	0,49	1,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Ejemplo de cálculo 3

Riesgo en curvas						
INPUT	Radio (m)	350				
	Categoría	2				
	C.inesperadas	No				
v (km/h)		100	110	120	130	140
δ_1 (0-1)		0,00	0,05	0,27	0,65	1,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Ejemplo de cálculo 4

Riesgo en curvas						
INPUT	Radio (m)	350				
	Categoría	2				
	C.inesperadas	Sí				
v (km/h)		100	110	120	130	140
δ _c (0-1)		0,00	0,07	0,34	0,82	1,00

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.5 Análisis crítico

Se ha encontrado una metodología que permite evaluar el riesgo asociado al conducir por una curva de un radio concreto según la velocidad a la que se circula.

La formulación propuesta para determinar los valores de v_1 y de v_2 y la tendencia escogida entre ellos está debidamente justificada. A partir de esta formulación, únicamente conociendo el radio mínimo de curvatura del tramo considerado y la categoría de carretera a la que pertenece, se determinan los valores de v_1 y de v_2 . Luego, considerado una velocidad de circulación específica se obtendrá el indicador de riesgo δ_1 .

Esta simplicidad del modelo es también su gran ventaja ya que permite evaluar cualquier tipo de carretera interurbana de una manera rápida, práctica y fiable.

Por otra parte, se ha considerado la posibilidad de que existan curvas inesperadas en el tramo que se está analizando. Su presencia se penaliza con la aplicación de un factor correctivo. En los tramos donde existen curvas de este tipo, una buena señalización puede rebajar el calificativo de curva "inesperada". Se podría tener en cuenta la señalización existente en curvas inesperadas, pero esta sofisticación se deja para trabajos posteriores. De todas maneras, en el apartado 3.2.6 ya se considera la señalización (tanto horizontal como vertical) presente en el tramo de estudio.

3.2.3 Evaluación del riesgo por las dimensiones de la plataforma (δ_2)

3.2.3.1 Antecedentes

Las dimensiones con las que se contruyen los elementos que integran la plataforma están directamente ligadas con la seguridad vial. Varios son los investigadores que han estudiado las relaciones entre la anchura del carril y arcén con la accidentalidad en carreteras.

Con respecto al carril, se ha demostrado en varios estudios que la seguridad en carreteras aumenta a medida que se incrementan las dimensiones de su anchura hasta cierto límite (E. Hauer, 2000 b). Se sabe que a partir de los 11 pies (3,55 m), esta mejoría en términos de seguridad desaparece y una vez rebasados los 12 pies (3,66 m) las dimensiones resultan ser contraproductivas en cuanto a la seguridad. Esto es debido a que, llegados a este valor, el conductor siente que puede circular a una velocidad mayor, cosa que puede originar situaciones de riesgo debido a este exceso de confianza.

En cuanto al arcén, el razonamiento es similar al del carril. Mientras se incrementa su anchura el riesgo a sufrir un accidente disminuye hasta llegar a los 2,5 m. A partir de esta dimensión el riesgo permanece constante y al sobrepasar los 3 m de anchura tiende a aumentar. Un arcén con dimensiones tan elevadas (>3 m) resulta contraproductivo porque en algunos momentos (cuando por ejemplo hay retenciones o el tráfico es muy elevado) el conductor se siente tentado a utilizar el arcén como carril adicional pudiendo crear una situación de riesgo comprometida.

La dimensiones exigidas por la actual instrucción española de carreteras, tanto para el carril como el arcén, están en coherencia con los datos expuestos en los párrafos superiores. Efectivamente, la anchura estándar del carril es 3,5 m y la del arcén oscila entre los 0,5 m y los 2,5 m.

Tabla 14. Dimensiones del carril y del arcén en España

Clase de carretera		Velocidad de proyecto (Km/h)	Carril (m)	Arcén [exterior] (m)
Calzadas separadas		120	3,5	2,5
		100	3,5	2,5
		80	3,5	2,5
Calzada única	Vías rápidas	100	3,5	2,5
		80	3,5	2,5
	Carreteras convencionales	100	3,5	1,5 – 2,5
		80	3,5	1,5 *
		60	3,5	1,0 – 1,5 *
		40 IMD > 2000	3,5	0,5
		40 IMD < 2000	3,0	0,5

* Para carreteras en terreno muy accidentado e IMD < 3000 se puede reducir de forma justificada la dimensión del arcén en 0,5 m como máximo.

Fuente: Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento

No obstante, existen muchos tramos de carretera que no cumplen con las exigencias de la actual instrucción. Por ejemplo, tramos que se diseñaron bajo la aplicación de normativas desfasadas y que aún no han sido actualizados o tramos de montaña en los que, por motivos económicos, los carriles son más estrechos de lo común y esta deficiencia viene compensada con unos límites de velocidad también menores de lo habitual. Parece lógico, por lo tanto, intentar relacionar el riesgo a sufrir un accidente de carretera (salida de vía) con las características y dimensiones de la plataforma.

Dentro de este apartado se propone una metodología semiempírica para evaluar el riesgo a salirse de la carretera en función de las dimensiones de la plataforma y de la velocidad de circulación. Como es evidente, a medida que las dimensiones sean menores y la velocidad crezca, este riesgo irá en aumento.

3.2.3.2 Elementos de la plataforma

El factor principal de evaluación es la anchura del carril. En las carreteras españolas, la dimensión del carril se suele situar alrededor de los 3,5 m. Como se explica en el apartado anterior, la anchura del carril tiene una gran importancia con respecto a la seguridad vial y más concretamente con la probabilidad de salirse de la vía de circulación.

Además de la propia anchura del carril existen otros elementos relacionados que también influyen en la posibilidad de salirse de la vía. Se han considerado la anchura del arcén, la presencia de bandas sonoras de aviso y la existencia de sobreancho del carril en aquellas curvas donde sea necesario.

Anchura del arcén

El arcén es un elemento básico y muy importante dentro del diseño lineal de una carretera. Su función principal es la de permitir a los peatones, ciclos y ciclomotores transitar por él. En condiciones excepcionales (averías, tráfico colapsado) un vehículo puede invadir el arcén si sus dimensiones lo permiten.

Para la tipología de accidente en la que se basa la tesina, las salidas de vía, el valor de la anchura del arcén tiene una importancia crucial. Como se explicará más adelante, el riesgo a sufrir un accidente de este tipo depende del tiempo de reacción disponible para que el conductor rectifique la trayectoria del vehículo, y éste depende a su vez de la anchura del arcén. Cuanto más ancho sea el arcén, mayor será el tiempo disponible para el conductor y, por lo tanto, menor será el riesgo a sufrir un accidente.

Bandas sonoras

La banda sonora es un tratamiento que se aplica en el borde exterior del carril y cuya función es la de avisar al conductor mediante una vibración de la invasión del arcén por parte del neumático del vehículo. Este tratamiento consiste en crear un relieve discontinuo

aplicando unas láminas transversales sobre las marcas viales que se encuentran en la frontera entre carril y arcén.

Es evidente que el tratamiento reduce la probabilidad de salirse de la vía. Sobre todo en tramos monótonos con rectas largas, en los que es posible que el conductor pierda la atención por unos instantes y la trayectoria del vehículo no sea entonces la adecuada.

Dada la aceptada mejoría que supone este elemento, sorprende que no exista en la literatura ningún estudio al respecto. De hecho, en la normativa española no se hace alusión a las bandas sonoras ni se recomienda su uso en ningún caso. De todas maneras es habitual notar la presencia de este tratamiento en autopistas, donde una salida de vía resultaría ser fatal.

En la metodología propuesta se tendrá en cuenta la mejoría en términos de seguridad que aporta la presencia de bandas sonoras de aviso.

Sobreancho

Como medida de seguridad en curvas cerradas, la vigente normativa española de carreteras obliga a construir las carreteras con un sobreancho en el carril en aquellas curvas cuyo radio sea inferior a 250 m. En estos casos, la anchura total del carril debe ser:

$$a_t = 3,5 + \left(l^2 / 2r \right) \quad (25)$$

Siendo l la longitud del vehículo, medida entre su extremo delantero y el eje de las ruedas traseras (m) y r el radio del eje en la curva horizontal (m).

El factor $l^2/2r$ de la suma es el ancho adicional o sobreancho aplicado. Salvo en casos excepcionales y convenientemente justificados, se considera el valor $l=9$ m. Por otra parte, es importante destacar que el sobreancho no se puede obtener disminuyendo el ancho del arcenes.

Dentro de la red de carreteras españolas, existen tramos con curvas que no tienen sobreancho debido seguramente a que fueron construidas aplicando una normativa anterior y que aún no han sido adaptadas a la nueva normativa. Una curva de estas características (sin sobreancho cuando la normativa lo exija) supone un defecto en el trazado que se tendrá en cuenta a la hora de evaluar las características de la plataforma.

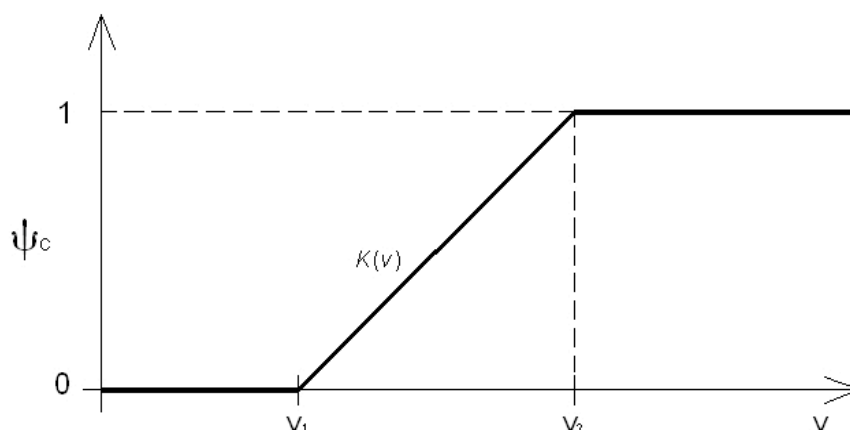
3.2.3.3 Criterios adoptados

Para evaluar el efecto del ancho del carril en la carretera se propone una función Ψ similar a la utilizada para evaluar la seguridad en curvas. Se trata de una función creciente que se mueve dentro del rango 0-1 y cuya variable es la velocidad de circulación.

$$\Psi_c(v) = \begin{cases} 0 & \text{si } v < v_1 \\ K(v) & \text{si } v_1 \leq v \leq v_2 \\ 1 & \text{si } v_2 < v \end{cases} \quad (26)$$

Cuando el valor de la función Ψ sea grande (próximo a 1), la posibilidad de salirse de la vía será alta mientras que cuando Ψ sea pequeño (próximo a 0) la posibilidad de salirse de la vía será casi nula. Gráficamente, la función propuesta tiene la siguiente forma:

Fig. 15. Función Ψ para unas dimensiones del carril concretas



Fuente: Elaboración propia

Los valores de v_1 y v_2 son respectivamente las velocidades de inicio de riesgo y de máximo riesgo de la función. Dependiendo del valor de la anchura del carril, la situación de v_1 y de v_2 variará. La función Ψ será, por lo tanto, diferente según las dimensiones del carril.

Como se explicó anteriormente, no existe ningún estudio o trabajo que relacione la posibilidad de salirse de la calzada en función de la velocidad a la que se circula teniendo únicamente en cuenta la anchura del carril. No obstante, en este estudio se propone una metodología lógica que se validará con un trabajo de campo en el capítulo 5.

Básicamente, el criterio seguido consiste en subdividir la anchura del carril en tres posibles rangos. Cada rango de valores presenta diferentes velocidades límite v_1 y v_2 . Los rangos y sus parejas respectivas (v_1, v_2) se dan en la siguiente tabla.

Tabla 15. Valores de las velocidades límite

		Velocidad (Km/h)	
		v_1	v_2
Anchura del carril (m)	$a \geq 3,5$	110	240
	$3 \leq a < 3,5$	90	190
	$a < 3$	60	110

Fuente: elaboración propia

Analizando los valores de v_1 y de v_2 , se observa que a medida que la anchura del carril va disminuyendo el riesgo a salirse de la vía aumenta al circular a una velocidad concreta. Esto es lógico ya que, durante un momento de inatención por parte del conductor, un ancho estrecho del carril implica un tiempo de rectificación menor que el de un ancho mayor.

Tendencia de $K(v)$

Tal y como se observa en la figura 15, la tendencia escogida para la función $K(v)$ es lineal. Esta linealidad entre los puntos v_1 y v_2 tiene una justificación física:

Dado un momento de inatención por parte del conductor, éste necesitará un tiempo de rectificación para volver a situar el vehículo en una posición adecuada. El riesgo a salirse de la vía dependerá entonces del tiempo del que dispone el conductor para enderezar el vehículo (t). Concretamente, la posibilidad de sufrir un accidente por salida de vía será inversamente proporcional al tiempo de rectificación disponible; cuando el tiempo sea alto el riesgo será mínimo y viceversa.

Matemáticamente, lo descrito se formula como:

$$K(v) \propto 1/t \quad (27)$$

Asimismo, suponiendo que la velocidad se mantiene constante, de la expresión $t=e/v$, se deduce que para un espacio concreto (para un ancho concreto) el tiempo de rectificación también es inversamente proporcional a la velocidad de circulación.

$$t \propto 1/v \quad (28)$$

De esta manera se deduce que el riesgo a salirse de la vía teniendo en cuenta el ancho del carril de la carretera es proporcional a la velocidad de circulación y por ello la tendencia escogida es lineal.

$$K(v) \propto v \quad (29)$$

Llegados aquí y sabiendo que la función $K(v)$ se sitúa entre los puntos v_1 y v_2 , su deducción es instantánea:

$$K(v) = C (v - v_1) = \frac{1}{(v_2 - v_1)} (v - v_1) \quad (30)$$

Así como se ha asumido que el conductor intentará enderezar la trayectoria del vehículo cuando se da cuenta que su dirección no es la adecuada, se podría pensar que también tiene la posibilidad de pisar el freno. Normalmente, en las salidas de vía, el ángulo de invasión del arcén es suave y con una leve rectificación se puede redirigir el vehículo. Por eso se ha priorizado la opción de rectificar la trayectoria frente a la de pisar el freno. Si se hubiese considerado la otra opción, la tendencia de la función $K(v)$ sería cuadrática (como en el caso de la ecuación 20).

Factores adicionales

Además del ancho del carril, existen otros factores que se han tenido en cuenta y que influyen en la posibilidad de sufrir un accidente por salida de vía. En la tesina, se han considerado como factores adicionales el valor de la anchura del arcén y la existencia o no de bandas sonoras de aviso.

La presencia de estos elementos hace variar en cierta medida los valores de v_1 y de v_2 . Por ejemplo, si existe un arcén con una anchura bastante grande ($\geq 1,5$ m), el tiempo de rectificación aumentará y por lo tanto el riesgo a sufrir una salida de vía disminuirá. La manera de cuantificar esta mejoría en cuanto a la seguridad se efectúa aumentando los valores de v_1 y v_2 .

Por otra parte, si existe una banda sonora entre el carril y el arcén que avise de la invasión del arcén por parte del vehículo, la posibilidad de sufrir una salida de vía también se verá reducida.

El incremento que se debe aplicar a los valores de v_1 y v_2 depende del valor de la anchura del arcén, de la presencia o no de bandas sonoras en el tramo de estudio y de la velocidad de circulación. A mayores velocidades de circulación el incremento tendrá que ser menor que a velocidades bajas porque el tiempo de rectificación disponible también es menor. Es decir, el valor de v_1 sufrirá un incremento mayor que el de v_2 .

$$\begin{aligned} v_{1_nuevo} &= v_{1_original} + \mu \\ v_{2_nuevo} &= v_{2_original} + \partial \\ \text{con } \partial &< \mu \end{aligned} \quad (31)$$

Siendo ∂ y μ dos vectores de desplazamiento.

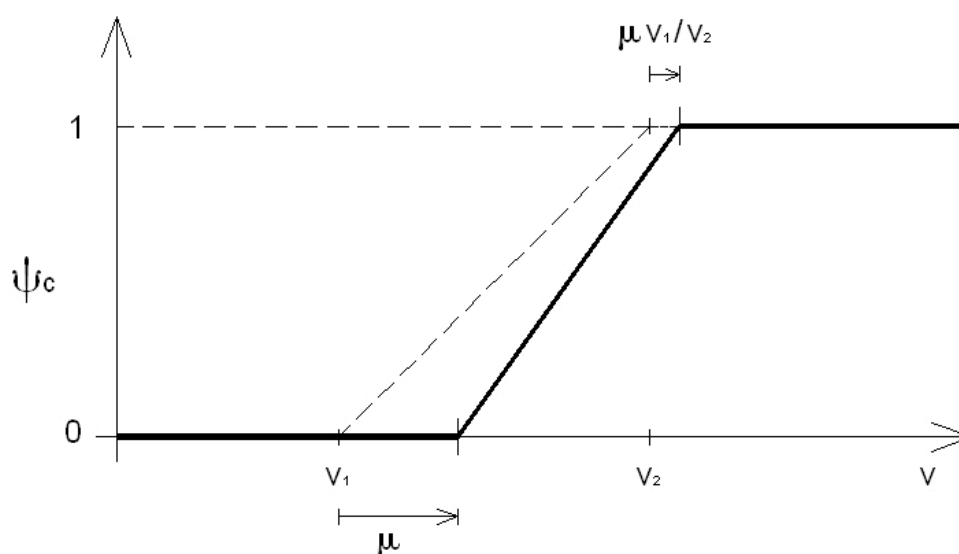
De la ecuación 28 se sabe que el tiempo de rectificación es inversamente proporcional a la velocidad. De aquí se deduce que:

$$\partial = \mu \cdot \frac{v_{1_original}}{v_{2_original}} \quad (32)$$

Con lo que, finalmente, se llega a:

$$v_{2_nuevo} = v_{2_original} + \mu \cdot \frac{v_{1_original}}{v_{2_original}} \quad (33)$$

Gráficamente, esta formulación se muestra a continuación:

Fig. 16. Incremento en v_i por las características del carril

Fuente: Elaboración propia

Para tener en cuenta el incremento que van a sufrir los valores de v_1 y v_2 se ha subdividido el arcén en tres grupos con rangos de anchura diferentes.

Tabla 16. Rangos de arcenes considerados

Grupo	Anchura del arcén (m)
1	$0 \leq b < 0,5$
2	$0,5 \leq b < 1,5$
3	$1,5 \leq b$

Fuente: elaboración propia

Cada grupo tiene asignado un valor de μ distinto. El valor de μ también variará si hay o no presencia de bandas sonoras de aviso. De esta manera se definen dos vectores de desplazamiento (μ_1 , μ_2); el primero no considera la presencia de bandas sonoras y el segundo sí las tiene en cuenta.

Tabla 17. Vectores μ_i

Grupo	Incremento (Km/h)	
	μ_1 (sin banda sonora)	μ_2 (con banda sonora)
1	0	2
2	5	7
3	10	13

Fuente: elaboración propia

A medida que la anchura del arcén aumenta el valor de μ también lo hace ya que el tiempo disponible para que el conductor rectifique la dirección del vehículo se amplía. Siguiendo el

mismo razonamiento, el vector μ_2 tiene valores mayores que el μ_1 porque la presencia de una banda sonora de aviso pone en alerta al conductor de manera que éste rectificará la trayectoria antes.

Factor multiplicativo

La presencia de sobreancho en aquellas curvas donde sea requerido es el único factor multiplicativo que se ha tenido en cuenta. En aquellos tramos con curvas con $R < 250$ m en las que no exista sobreancho se propone un factor corrector que penalice esta ausencia.

El factor multiplicativo tiene un valor de 1,15. Es decir, la ausencia de sobreancho en aquellas curvas donde la normativa lo exija se penaliza con un aumento del 15% del riesgo a sufrir un accidente. En cualquier caso, este aumento del 15% nunca podrá suponer un riesgo δ_2 mayor de la unidad. Matemáticamente:

$$\delta_2 = \min\{1,15 \Psi_{carril}^{arcén}(v), 1\} \quad (34)$$

Si no se aplica factor correctivo, debido a que no existen curvas con radio de curvatura menor a 250 metros o bien porque sí que está construido el sobreancho ahí donde debe estar presente:

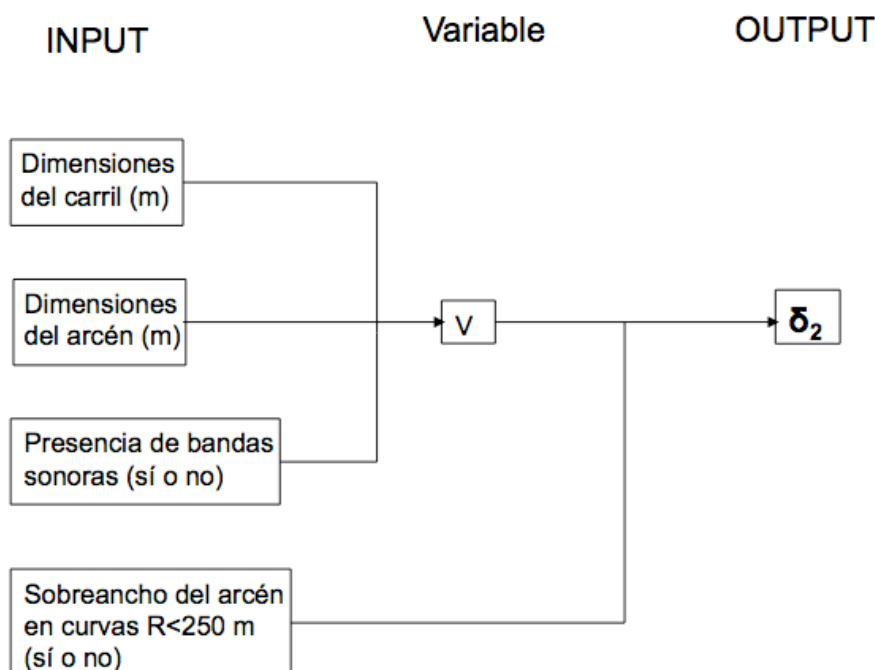
$$\delta_2 = \Psi_{carril}^{arcén}(v) \quad (35)$$

3.2.3.4 Obtención de δ_2

Para englobar a todos los valores adoptados descritos en el apartado anterior se ha hecho uso de una hoja de cálculo. La metodología de cálculo ha consistido en programar la hoja de manera que al introducir los valores de entrada (inputs) se obtuviese el valor del riesgo asociado δ_2 (output). Este valor se sitúa siempre entre 0 y 1.

Esquemáticamente, el cálculo realizado por la hoja es el siguiente:

Fig. 17. Esquema de cálculo



Fuente: Elaboración propia

Se considera que el valor de la anchura del carril será constante a lo largo del tramo de estudio y que la banda rugosa estará o no presente a lo largo de la totalidad del tramo. Esta consideración es lógica ya que la tramificación de la carretera se efectúa siguiendo criterios de homogeneidad y, por lo tanto, es de esperar que estos factores permanezcan constantes a lo largo del tramo.

En cambio, la anchura del arcén sí es posible que sufra variaciones a lo largo del tramo, siendo éste un factor más inestable. Se escogerá aquel valor de la anchura menor para considerar la situación más desfavorable.

Finalmente, hay que recordar que el valor de δ_2 no se debe considerar como una probabilidad de salirse de la vía en el sentido estricto de la palabra, si no más bien como un indicador de la seguridad que ofrecen las dimensiones de la plataforma durante la conducción.

3.2.3.5 Ejemplo de cálculo

En las tablas siguientes se calcula el valor del índice δ_2 para diferentes tramos de carretera teóricos aplicando la metodología propuesta. Se especifican también las velocidades consideradas en cada cálculo.

Tabla 18. Ejemplo de cálculo 1

Riesgo por las dimensiones de la plataforma					
INPUT	Dimensión carril (m)	3,5			
	Dimensión arcén (m)	1,5			
	Bandas sonoras	Sí			
	Sobreebanco	No es necesario ($R_{\min}>250m$)			
v (km/h)		110	150	200	250
δ_2 (0-1)		0,00	0,26	0,66	1,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Ejemplo de cálculo 2

Riesgo por las dimensiones de la plataforma					
INPUT	Dimensión carril (m)	3,3			
	Dimensión arcén (m)	1,0			
	Bandas sonoras	No			
	Sobreebanco	No es necesario ($R_{\min}>250m$)			
v (km/h)		90	130	170	200
δ_2 (0-1)		0.00	0.32	0.74	1.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Ejemplo de cálculo 3

Riesgo por las dimensiones de la plataforma					
INPUT	Dimensión carril (m)	2,9			
	Dimensión arcén (m)	0,3			
	Bandas sonoras	No			
	Sobreebanco	No presente en R<250m			
v (km/h)		70	80	90	110
δ ₂ (0-1)		0,00	0,25	0,51	1,00

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.6 Análisis crítico

La evaluación del riesgo ligado a las dimensiones de la plataforma no es una tarea simple. En la literatura sobre seguridad vial únicamente se ha relacionado el riesgo asociado a las dimensiones de la plataforma con respecto al flujo de vehículos en carretera (C.V. Zegeer, 1981), pero nunca con respecto a la velocidad de circulación, que es lo que en este trabajo se intenta evaluar. Hay que tener en cuenta, por lo tanto, que la metodología propuesta supone una primera aproximación a este factor tan complejo.

Los valores de v_1 y v_2 dados en la tabla no tienen una justificación concreta y han sido determinados según un razonamiento “intuitivo” que se debería validar en estudios posteriores.

Por otra parte, el método propuesto tiene la ventaja de poder aplicarse a cualquier tipo de carretera interurbana de calzada única y con un único carril por sentido de circulación. Para

carreteras con varios carriles, la evaluación es mucho más compleja y queda fuera del alcance de esta tesina.

Por último, cabe destacar que las dimensiones de la plataforma suelen estar ligadas con otras características de la infraestructura, por eso resulta difícil aislar este parámetro y evaluarlo independientemente de otros factores. Por ejemplo, una carretera con dimensiones pequeñas del carril y del arcén suele ir asociada con características deficientes en cuanto al diseño de la carretera como curvas cerradas, visibilidad reducida, etc. Dentro de esta complejidad, la evaluación de las dimensiones del carril y de arcén ha supuesto un reto que al final se ha superado.

3.2.4 Evaluación del riesgo por el estado del pavimento (δ_3)

3.2.4.1 Antecedentes

Uno de los principales factores físicos que influyen en la seguridad vial es la fricción producida entre el neumático y la superficie de rodadura. Es el pavimento, que en contacto con los neumáticos, transfiere la fricción necesaria para que la dinámica del vehículo funcione adecuadamente.

Las grietas, fisuras e irregularidades en la superficie de rodadura reducen el confort durante la conducción y además suponen un peligro para los usuarios de la carretera. Una vía con el pavimento deteriorado dificulta mantener la trayectoria adecuada del vehículo y, en los casos extremos, puede originar una pérdida de control de éste. Es evidente que cuando mayor sea la velocidad de circulación y peor el estado del pavimento, más posibilidades habrá de perder el control del vehículo y de sufrir un accidente.

La evaluación del estado del pavimento es un proceso que realiza el conductor y que requiere una gran demanda de atención cognitiva. Para operar el vehículo, el conductor hace uso de información visual y auditiva de la carretera; como por ejemplo la apariencia de la superficie de rodadura, el sonido producido por los neumáticos o la moción longitudinal y lateral del vehículo. Esta información es procesada por el conductor y le sirve para juzgar el grado de fricción o estado del pavimento y así adaptar su velocidad.

Al conducir realizamos, por lo tanto, una evaluación subjetiva del estado del pavimento según varios criterios propios. La única manera de evitar esta subjetividad durante la evaluación consiste en extraer muestras de superficie de pavimento, analizarlas en el laboratorio y obtener parámetros descriptivos de éste, como el coeficiente de fricción transversal f_t o el índice internacional de rugosidad IRI .

Desgraciadamente, el análisis en el laboratorio tiene tres desventajas insalvables: Por una parte, se necesitan los medios para realizar este análisis (mayoritariamente económicos). Por otra, el análisis en el laboratorio es lento, cosa que supone disponer de mucho tiempo

para la evaluación de un tramo de carretera. Finalmente, son muy pocos los estudios realizados en este campo de la seguridad vial y los resultados aún no son concluyentes; por lo tanto no existe un método científico suficientemente fiable que relacione las propiedades del pavimento con la velocidad de circulación y su accidentalidad asociada.

En los siguientes apartados se propone un método práctico y rápido para evaluar el estado del pavimento que no posee una base matemática rigurosa pero con el que se obtienen unos resultados suficientemente válidos para el alcance de la tesina.

3.2.4.2 Factores de evaluación

El estado del pavimento depende de varios factores. El paso del tiempo, el tránsito de los vehículos (sobretudo los pesados) y las inclemencias climáticas producen un desgaste constante sobre la superficie de rodadura que se traduce mediante un deterioro de la carretera.

Por otra parte, la humedad del pavimento juega un papel muy importante en la fricción producida entre la superficie de rodadura y el neumático. La resistencia al deslizamiento transversal, que es el factor que describe el agarre del neumático sobre el pavimento, depende directamente de la humedad de la superficie de rodadura. Cuanta más humedad, menor resistencia transversal y por lo tanto mayor probabilidad de deslizamiento del neumático.

Para contrarrestar esta pérdida de resistencia cuando el pavimento está mojado, el conductor suele disminuir la velocidad de su vehículo. De hecho, en algunos países europeos como Francia, la disminución es obligatoria (el límite de velocidad baja cuando está lloviendo). La reducción de velocidad llevada a cabo por los conductores cuando las condiciones climáticas no son favorables ha sido analizada por diversos investigadores y sus resultados son algo alarmantes (H. Amstrom, 2001). En el caso de lluvia, se ha comprobado que esta reducción de velocidad por parte del conductor no se adapta proporcionalmente a la pérdida de resistencia correspondiente debida a que el pavimento se encuentre mojado. En realidad, la reducción de velocidad debería ser mucho mayor para no comprometer la seguridad durante la conducción.

Estos datos se tienen en cuenta al adoptar los criterios para definir la metodología de evaluación de este subapartado.

3.2.4.3 Criterios adoptados

Se ha optado por escoger un criterio de trabajo que permita evaluar el estado del pavimento de una manera fácil y fidedigna. Una inspección visual del pavimento y su posterior clasificación dentro de tres grupos distintos parece un criterio simple y válido. Así pues, se

ha subdividido el estado del pavimento según tres posibles estados: estado bueno, aceptable o deteriorado.

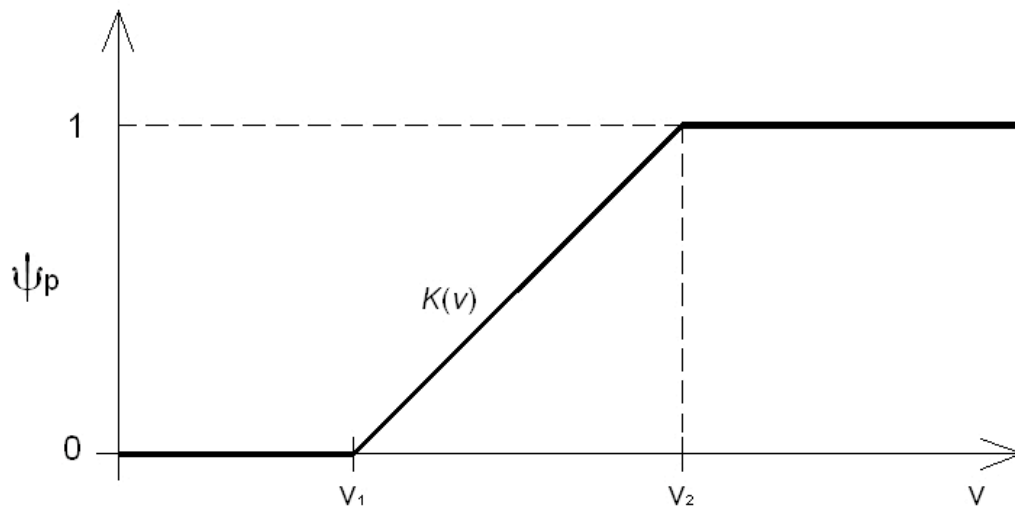
Durante la inspección de la carretera, únicamente se tendrá que identificar el estado correspondiente al tramo de estudio. Seguramente, algunas secciones del tramo tendrán distintas clasificaciones. Si esto ocurre, se deberá anotar la longitud de cada sección con el fin de calcular la proporción del tramo afectada por cada estado. De todas maneras, como durante la fase de tramificación de la carretera la homogeneidad es uno de los principios seguidos, es de prever que uno de los tres estados sea predominante con respecto a los otros dos.

Cada estado tiene asignada una función de riesgo Ψ distinta que toma valores entre 0 y 1 dependiendo de la velocidad a la que se circula. Cuando los valores de la función se acerquen a 1, la posibilidad de sufrir un accidente por salida de la vía será alta mientras que cuando se acerquen a 0 esta posibilidad será casi nula. Matemáticamente:

$$\Psi_p(v) = \begin{cases} 0 & \text{si } v < v_1 \\ K(v) & \text{si } v_1 \leq v \leq v_2 \\ 1 & \text{si } v_2 < v \end{cases} \quad (36)$$

Gráficamente, la función se modeliza tal y como muestra la figura 18.

Fig. 18. Función Ψ para un estado del pavimento concreto



Fuente: Elaboración propia

Los valores de v_1 y v_2 son respectivamente las velocidades de inicio de riesgo y de máximo riesgo de la función. Para cada estado, se han considerado unos valores distintos de v_1 y v_2 . En la tabla 21 se especifican estos valores considerados tanto para pavimento seco como para pavimento mojado.

Tabla 21. Velocidades límite consideradas durante la evolución del pavimento

	Pavimento seco		Pavimento mojado	
	v_1 (km/h)	v_2 (km/h)	v_1 (km/h)	v_2 (km/h)
1.Estado bueno	-	-	100	140 ($\Psi_1^{\max} = 0,7$)
2.Estado medio	70	150	50	110
3.Estado deteriorado	30	90	30	70

Fuente: Elaboración propia

En el caso en que el estado del pavimento se clasifique como estado bueno y el pavimento esté mojado, la función de riesgo toma como máximo valor el de 0,7. De esta manera se minimiza el peso que tiene el factor del pavimento cuando éste se encuentra en buen estado. Por otra parte, se ha considerado que cuando el pavimento está seco y además su estado es bueno, la posibilidad de salirse de la vía es nula sea cual sea la velocidad de circulación. Es decir, en condiciones óptimas del pavimento, la posibilidad de salirse de la vía es imposible si únicamente se tiene en cuenta la influencia del pavimento ($\Psi_1^{\text{seco}} = 0$).

Como se muestra en la tabla 21, en el caso en que el pavimento se encuentre mojado, los valores de v_1 y v_2 varían para penalizar este estado. Como se explicó en el apartado 3.2.4.2, la humedad del pavimento produce una reducción importante en la resistencia al deslizamiento transversal del pavimento, que se traduce en una disminución global de la seguridad durante la conducción.

Para compensar esta pérdida de resistencia transversal cuando el pavimento se encuentra húmedo, el conductor suele disminuir la velocidad de circulación. Se ha considerado una reducción de 10 km/h con respecto a la velocidad a la que se circularía si el pavimento estuviera en condiciones secas.

$$v_{\text{mojado}} = v_{\text{seco}} - 10 \quad (37)$$

La humedad del pavimento se ha tenido en cuenta según los días de lluvia al año ocurridos en el tramo de estudio. Se ha simplificado el problema considerando que un día en el que se registran precipitaciones implica que el pavimento se encuentra húmedo durante las 24 horas. Los datos del número de días de lluvia al año en un región se pueden consultar en la red, concretamente en la página del Servicio Meteorológico de Cataluña.

Entre los puntos v_1 y v_2 , la tendencia de la función escogida es lineal. La adopción de esta tendencia no sigue un criterio matemático o físico como en los casos anteriores. Ante la falta de datos y de trabajos se ha optado como primera propuesta la tendencia más simple: la lineal.

Por último, cabe que destacar que en el apartado no se ha considerado ningún factor multiplicativo. Sería un error intentar sofisticar el valor de δ_3 con factores multiplicativos ya

que la metodología utilizada es muy simple y se entraría entonces en una situación de incoherencia.

3.2.4.4 Obtención de δ_3

La metodología de cálculo consiste en relacionar los datos de entrada del modelo para poder obtener el resultado final δ_3 , que es el riesgo a sufrir un accidente por salida de vía debido al estado del pavimento. Éste depende de la velocidad de circulación y del propio estado de la vía.

El modelo de cálculo engloba todos los criterios y valores ya definidos. Estos se han introducido dentro de una hoja de cálculo. Como datos de entrada, se consideran las longitudes del tramo que pertenecen a cada estado del pavimento, la longitud total del tramo y los días de lluvia al año que se producen en la región donde se sitúa el tramo de estudio. Con estos datos se obtiene el porcentaje del tramo perteneciente a cada estado y el porcentaje de días del año afectado por las lluvias (pavimento mojado).

Tabla 22. *Proporciones consideradas*

	Proporción
Tramo en buen estado	$long. estado bueno / long. total = a$
Tramo en estado medio	$long. estado medio / long. total = b$
Tramo en mal estado	$long. estado deteriorado / long. total = c$
Pavimento mojado	$días con lluvia al año / 365 = d$
Pavimento seco	$días sin lluvia al año / 365 = e = 1 - d$

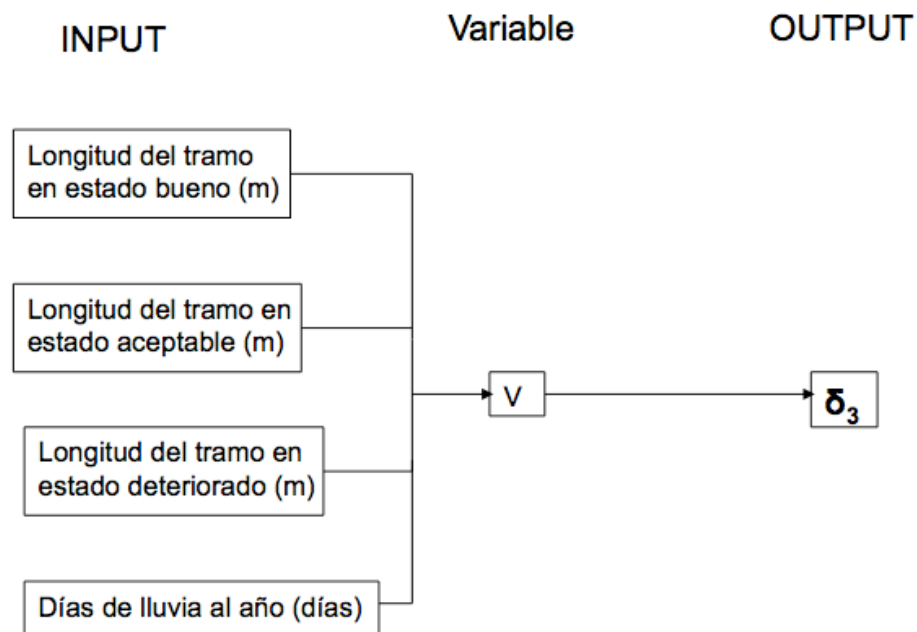
Fuente: Elaboración propia

A partir de estos datos, el cálculo de δ_3 es directo. Su formulación se escribe a continuación:

$$\delta_3 = \Psi_1^{mojado} a d + \Psi_2^{seco} b e + \Psi_2^{mojado} b d + \Psi_3^{seco} c e + \Psi_3^{mojado} c d \quad (38)$$

Introducidos los datos de entrada necesarios, la hoja de cálculo utilizada devuelve el valor de δ_3 a partir de una programación simple. A continuación se esquematiza el proceso seguido por la hoja de cálculo:

Fig. 19. Esquema de cálculo



Fuente: Elaboración propia

Como en los apartados anteriores, el valor de δ_3 estará siempre comprendido entre 0 y 1. Es de destacar que este valor no se debe tratar como una probabilidad de salirse de la vía en el sentido estricto de la palabra, si no más bien como un indicador de seguridad que ofrece el pavimento.

3.2.4.5 Ejemplo de cálculo

Se dan a continuación los resultados obtenidos al aplicar la metodología para calcular δ_3 .

Tabla 23. Ejemplo de cálculo 1

Riesgo por estado del pavimento						
INPUT	Long. estado bueno (m)		2000			
	Long. estado medio (m)		0			
	Long. estado deteriorado (m)		0			
	Días de lluvia al año		45			
v (km/h)			100	120	140	160
δ_3 (0-1)			0.00	0.04	0.9	0.09

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Ejemplo de cálculo 2

Riesgo por estado del pavimento					
INPUT	Long. estado bueno (m)	0			
	Long. estado medio (m)	2000			
	Long. estado deteriorado (m)	0			
	Días de lluvia al año	45			
v (km/h)		50	80	120	150
δ ₃ (0-1)		0,00	0,17	0,67	1,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Ejemplo de cálculo 3

Riesgo por estado del pavimento					
INPUT	Long. estado bueno (m)	0			
	Long. estado medio (m)	0			
	Long. estado deteriorado (m)	2000			
	Días de lluvia al año	45			
v (km/h)		30	50	70	90
δ_3 (0-1)		0.00	0.35	0.71	1.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Ejemplo de cálculo 4

Riesgo por estado del pavimento					
INPUT	Long. estado bueno (m)	1000			
	Long. estado medio (m)	800			
	Long. estado deteriorado (m)	200			
	Días de lluvia al año	45			
v (km/h)		30	70	110	150
δ ₃ (0-1)		0,00	0,09	0,33	0,54

Fuente: Elaboración propia

En las tres primeras tablas se considera que la totalidad del tramo ofrece el mismo estado del pavimento en su longitud. La cuarta tabla trata un caso más real, en el que los tres estados se ven representados en una sección concreta.

3.2.4.6 Análisis crítico

Se ha encontrado una metodología que permite evaluar el riesgo asociado al estado del pavimento en función de la velocidad de circulación para cualquier tramo de carretera interurbano. Es la primera vez que se relacionan estos tres elementos, cosa que hay que valorar positivamente.

De los tres factores de evaluación de la infraestructura considerados en el modelo (características de las curvas, dimensiones de la plataforma y estado del pavimento), el estado del pavimento es aquel en el que menos datos se disponen y sobre el cual menos se

ha estudiado dentro del ámbito de la seguridad vial. Es por ello, que los valores en los que se basa el modelo no tienen una justificación matemática o física evidente.

De hecho, los valores de la tabla 21 han sido escogido según un razonamiento intuitivo y se deberían validar mediante encuestas o analizar en investigaciones futuras.

Por lo tanto, la metodología propuesta supone una primera aproximación relativamente simple a este complejo factor que debería sofisticarse en trabajos posteriores. No obstante, la simplicidad de la metodología no resta validez al método global que se está definiendo.

3.2.5 Unión de δ_1 , δ_2 y δ_3

3.2.5.1 Justificación

La ocurrencia de un accidente se produce por la superposición de varios factores. Considerando únicamente los relacionados con la infraestructura, es difícil (casi imposible) atribuir el accidente a un solo motivo. Análogamente, el riesgo a salirse de la vía tampoco puede atribuirse a un único factor de la infraestructura. Por eso es necesario unir los factores parciales hasta ahora definidos para obtener uno global que se acerque más a la realidad de la accidentalidad.

La finalidad de este capítulo es la de encontrar un indicador de seguridad global para los accidentes de tráfico por salida de vía. Tanto δ_1 , δ_2 como δ_3 son indicadores parciales que únicamente evalúan las curvas, las dimensiones de la plataforma y el estado del pavimento respectivamente. Para poder trabajar de una forma cómoda y práctica es necesario encontrar una manera de englobar los tres indicadores dentro de uno único δ .

Una primera propuesta muy simple sería la de englobar los tres factores mediante una media. Esta operación asume que cada factor tiene la misma importancia. No obstante, en la práctica, el peso o importancia de cada factor no se reparte por igual. Por ejemplo, en una carretera de montaña el factor δ_1 tendrá un mayor peso que los dos restantes ya que la presencia de curvas en estos tramos es elevada. En cambio, en un tramo recto el factor δ_1 no tendrá un valor tan elevado y puede que las dimensiones de la plataforma (δ_2) o el estado del pavimento (δ_3) adquieran una mayor importancia.

Del razonamiento descrito se deduce que una metodología práctica y válida para englobar los tres factores es la de ponderar cada uno de ellos y sumarlos a continuación. En el siguiente apartado se describen los criterios asumidos para realizar esta unión de δ_1 , δ_2 y δ_3 .

3.2.5.2 Metodología

La metodología propuesta para unificar en un solo indicador δ a los otros tres consiste en asignar un peso a cada factor según el tipo de relieve que tiene el tramo que se esté analizando. Estos relieves son tres: tramo llano, tramo ondulado y tramo montañoso. La razón de realizar esta distinción entre tipos de tramos es debida a que se ha considerado que en cada relieve priman algunos factores con respecto a otros.

El tipo de relieve está directamente ligado con la inclinación media de la línea de máxima pendiente de cada tramo. A continuación se indican los rangos de las inclinaciones asociadas a cada relieve:

Tabla 27. *Relieve de la carretera según el valor de la máxima inclinación*

Tipo de relieve	Máxima inclinación (%)
Llano	$i < 5$
Ondulado	$5 < i < 10$
Montañoso	$10 < i$

Fuente: Elaboración propia

Dentro de cada tipología de tramo (llano, ondulado o montañoso), cada factor tiene asignado un peso comprendido entre los valores de 1 y 5. Cuanto mayor sea la importancia relativa de un factor, mayor será el valor escogido. Esta manera de proceder es equivalente a la realizada en los proyectos de ingeniería durante el análisis multicriterio entre alternativas (método PATTERN).

Los valores del peso escogidos para cada tipología de carretera se especifican a continuación:

Tabla 28. *Pesos asignados a cada factor*

Tipología del tramo	Pesos		
	(δ_1)	(δ_2)	(δ_3)
Llano	2	3	2
Ondulado	4	3	1
Montañoso	5	2	1

Fuente: Elaboración propia

Los valores de la tabla se han obtenido después de un riguroso análisis del problema. Como se observa, en los tramos montañosos se priman las características de las curvas mientras que en tramos llanos las dimensiones de la plataforma pasan a jugar un papel más importante. En el caso en que la inclinación de la pendiente dé lugar a una tipología de tramo ondulado, sus pesos se sitúan en un lugar intermedio entre los dos tramos anteriores.

Más importante aun que el valor del peso de cada factor es la importancia relativa de cada uno de ellos. Su cálculo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 29. Pesos relativos de cada factor

Tipología del tramo	Pesos relativos		
	β_1	β_2	β_3
Llano	$2/(2+3+2)$	$3/(2+3+2)$	$2/(2+3+2)$
Ondulado	$4/(4+3+1)$	$3/(4+3+1)$	$1/(4+3+1)$
Montañoso	$5/(5+2+1)$	$2/(5+2+1)$	$1/(5+2+1)$

Fuente: Elaboración propia

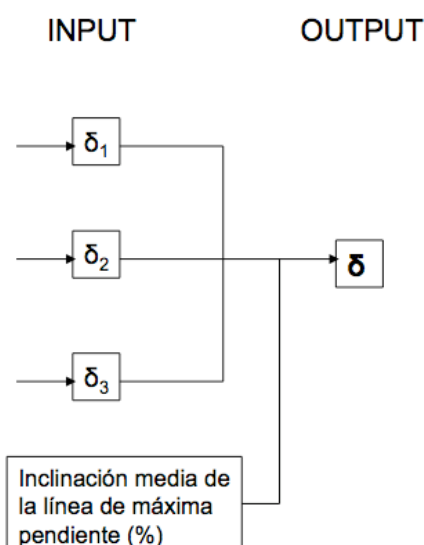
Con la división realizada en la tabla 29 se determina la proporción de cada factor a considerar para obtener el indicador de riesgo global δ . Es decir,

$$\delta = \sum_{i=1}^3 \delta_i \beta_i \quad (39)$$

Dependiendo del valor de la inclinación i que tenga el tramo, el valor del riesgo global corresponderá a δ_{llano} , δ_{ondulado} o $\delta_{\text{montañoso}}$. De hecho, el único dato de entrada (input) de este cálculo es el valor de i porque los pesos de la tabla 28 ya están definidos.

Cualquiera de los tres δ tiene un valor comprendido entre 0 y la unidad. 0 indica un riesgo (global) mínimo de salirse de la vía, mientras que un valor de 1 implica un riesgo alto. Cabe recordar que el valor de δ está asociado a una velocidad de circulación concreta. A medida que aumente la velocidad en una sección de carretera, el indicador global δ irá incrementando. El esquema global de cálculo realizado en este apartado se muestra en la figura 20:

Fig. 20. Esquema de cálculo



Fuente: Elaboración propia

La obtención de este indicador global supone un paso adelante dentro de la metodología propuesta. Únicamente falta aplicar un último factor correctivo γ al valor de δ para obtener el indicador de riesgo I_R (apartados 3.2.6 y 3.2.7).

3.2.5.3 Análisis crítico

La metodología propuesta para unificar los indicadores δ_1 , δ_2 y δ_3 en un indicador común δ no está sacada de la nada. El método PATTERN se ha aplicado desde hace varias décadas en muchos estudios científicos, y su validez ha quedado ampliamente demostrada.

Como se dijo en la introducción, la explicación a un accidente nunca es debida a la presencia de un único factor. De hecho, la mala puntuación de un factor se puede compensar en cierta medida con una buena puntuación de los otros dos. Por ejemplo, la presencia de curvas cerradas en un tramo de carretera no comprometerá tanto a la seguridad si el estado del pavimento es óptimo y las dimensiones del carril y del arcén son generosas. La formulación escogida para unir los tres indicadores parciales sigue esta reflexión y por eso se aproxima más a la realidad de la accidentalidad.

No obstante, existen otras formulaciones para unificar indicadores parciales. Una de ellas es la conocida formulación de Cobb-Douglas, que se suele aplicar en el ámbito de la economía. Considerando tres indicadores parciales, la fórmula de Cobb-Douglas quedaría como:

$$\delta = \prod_{i=1}^3 \delta_i^{\beta_i} \quad (40)$$

Durante el desarrollo de la metodología de cálculo, se calcularon los resultados aplicando tanto la fórmula de la ecuación 39 como la de Cobb-Douglas. Los resultados obtenidos fueron muy similares en ambos casos. Finalmente, se escogió la formulación del método PATTERN debido a su mayor simplicidad y facilidad de entendimiento.

Por último, hay que destacar que los pesos considerados en la tabla 28 han sido escogidos después de un riguroso análisis del problema. De todas maneras, la adopción de estos valores la ha realizado una única persona. Sería conveniente que más ingenieros discutieran sobre estos valores con el objeto de maximizar la objetividad del estudio. Si se considera oportuno, estos valores pueden ser modificados sin alterar al conjunto de la metodología.

3.2.6 Factor correctivo γ

Además de las tres familias de factores (curvas, dimensiones de la calzada y estado del pavimento) que se han considerado a lo largo del desarrollo de la metodología de cálculo, existen muchos otros factores relativos a la infraestructura de la vía que todavía no se han tratado. Si bien es cierto que las tres familias consideradas suponen aquellos elementos

más directamente ligados con la infraestructura de la carretera, hay otros cuantos que bajo su presencia alteran en cierta medida la seguridad del tráfico.

Para completar el modelo de cálculo, se ha creído conveniente incluir un último factor correctivo (γ) que tenga en cuenta otros factores hasta ahora no tratados. Estos factores son la visibilidad, la señalización y la pendiente máxima del tramo.

De los tres, el único que se puede determinar cuantitativamente es la pendiente. Para evaluar los otros dos habrá que tratarlos por rangos de características cualitativas. En el siguiente apartado se describe la metodología seguida para tener en cuenta estos tres nuevos elementos y se dan los valores correctivos a aplicar sobre δ .

3.2.6.1 Metodología de cálculo

En la metodología de cálculo se ha tratado, por una parte, la visibilidad y la señalización de forma conjunta y, por otra, el valor de la pendiente máxima del tramo de estudio.

En cuanto a la visibilidad y a la señalización, ambos son factores cualitativos y se han subdividido dentro de tres posibles evaluaciones respectivamente: visibilidad o señalización buena, aceptable o deficiente.

Para escoger entre una de las tres posibilidades es necesaria una inspección visual del tramo de estudio. Si la adopción de una de las tres posibilidades, tanto para la visibilidad como para la señalización, no resulta evidente se puede consultar la siguiente tabla, donde se dan unas indicaciones de aquello que se puede evaluar para facilitar esta tarea:

Tabla 30. Indicaciones para la evaluación de la señalización y de la visibilidad

Señalización	Visibilidad
<ul style="list-style-type: none"> -Aviso de irregularidades en la carretera (curvas cerradas, paso de animales, intersecciones, etc.). -Postes reflectantes en curvas peligrosas. -Existencia de paneles de información variable en la carretera. 	<ul style="list-style-type: none"> -Coordinación entre curvas verticales y horizontales. -Vegetación en los laterales. -Iluminación de la carretera alrededor de las intersecciones.

Fuente: Elaboración propia

En función de las puntuaciones obtenidas, el factor correctivo variará. Cuanto mejor sea la puntuación de cada elemento, menor será el factor multiplicativo (factor correctivo) y viceversa. Los dos elementos se tratan conjuntamente mediante una matriz correctora, en la que se indican los factores multiplicativos considerados.

Tabla 31. Matriz correctiva

γ_1		Señalización		
		✓ (buena)	– (aceptable)	✗ (deficiente)
Visibilidad	✓	0,9	1	1,1
	–	1	1,05	1,15
	✗	1,1	1,15	1,2

Fuente: Elaboración propia

Para simplificar la notación, se llamará γ_1 al factor correctivo obtenido. Hay que destacar que este factor correctivo puede adoptar valores menores y mayores que la unidad. Esto implica que γ_1 podrá mejorar (disminuir) o empeorar (aumentar) el valor del índice de riesgo I_R , cosa que no ocurría con los factores multiplicativos utilizados durante la obtención de los indicadores δ_1 y δ_2 , en los que únicamente se podía empeorar el resultado o mantenerlo inalterado.

Por otra parte, la pendiente se ha tratado independientemente de la visibilidad y de la señalización. Éste es un parámetro cuantitativo que requiere una metodología diferente.

Se sabe que en aquellos tramos con una pendiente pronunciada se producen más accidentes que en los tramos llanos. Este aumento en accidentalidad se explica porque al haber más inclinación, es más fácil perder el control del vehículo durante la bajada y, por lo tanto, sufrir un accidente y salirse de la vía. En la literatura sobre seguridad vial, se ha dirigido únicamente un estudio acerca de la accidentalidad en carreteras con diferente pendiente (R.P. Bligh, 2005). Del análisis de varias secciones de carretera con distintas inclinaciones se vio que el riesgo a sufrir un accidente aumenta en un 1,6% por cada incremento en un 1% de la pendiente.

$$\Delta = 1,06 \, i = \gamma_2 \quad (41)$$

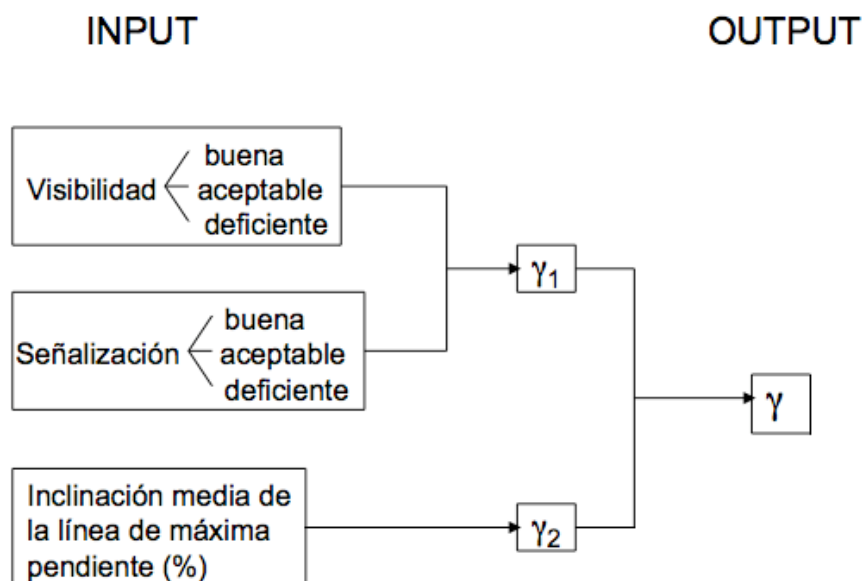
Donde i es la inclinación media de la línea de máxima pendiente.

Al resultado de la ecuación 41 se le nombrará γ_2 por motivos de notación. El factor correctivo completo es igual a la multiplicación de γ_1 y γ_2 . Matemáticamente:

$$\gamma = \gamma_1 \, \gamma_2 \quad (42)$$

El siguiente esquema resume el cálculo realizado. Se indican los datos de entrada y el resultado obtenido.

Fig. 21. Esquema de cálculo



Fuente: Elaboración propia

Es de destacar que la variable i es la misma que la considerada en la tabla 27 pero su tratamiento es diferente respecto a la ecuación 41. Mientras que en la tabla 27 el valor de la inclinación media de la línea de máxima pendiente se utiliza para clasificar el tramo dentro de una tipología, en la ecuación 41 sirve para obtener un factor correctivo (γ_1).

3.2.7 Cálculo de I_R

Con la obtención del factor correctivo γ finaliza la fase de recogida de datos de entrada del modelo. El índice de riesgo propuesto se calcula multiplicando los valores de δ y γ :

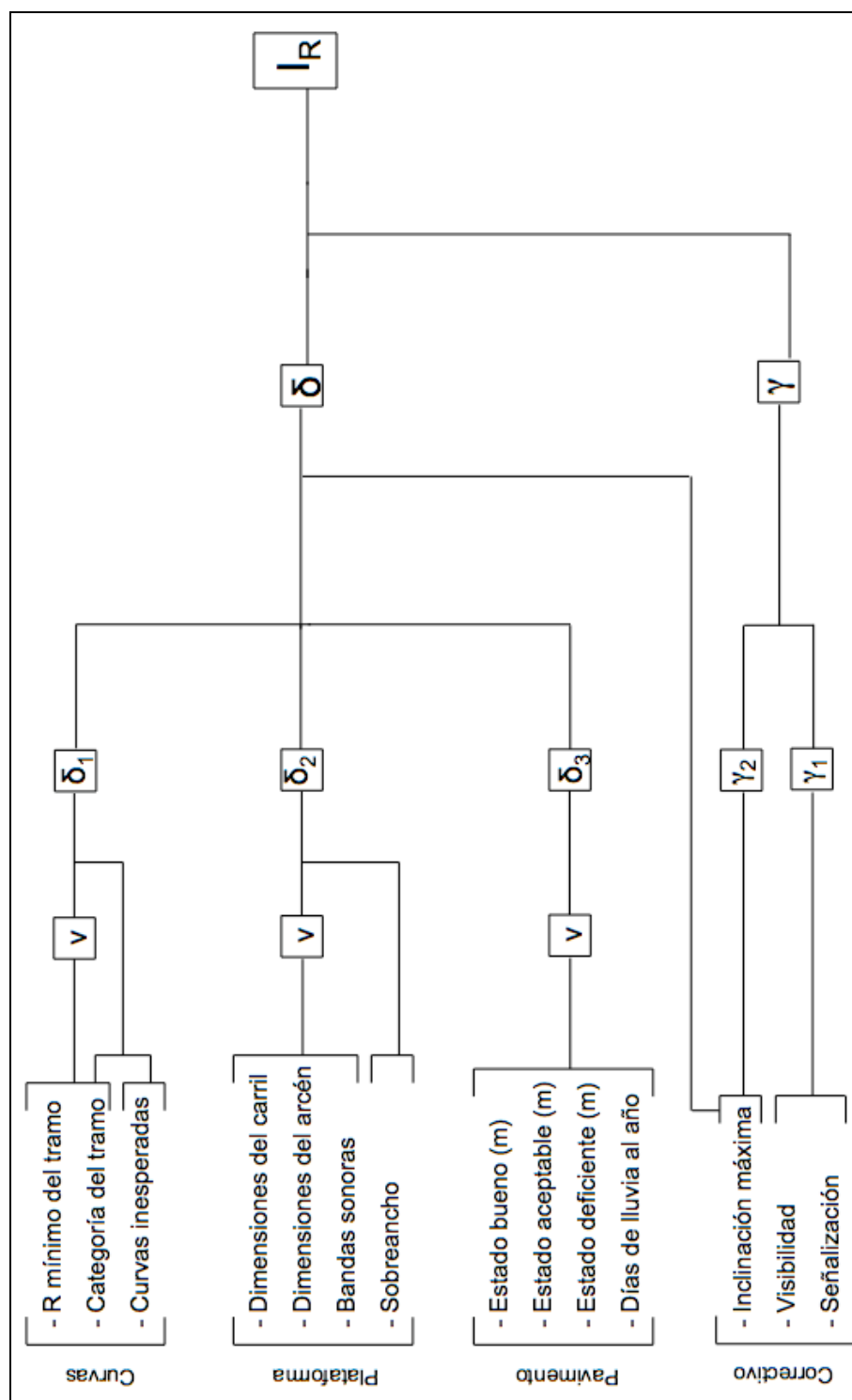
$$\begin{aligned} I_R &= 100 \delta \gamma = 100 f(\delta_1, \delta_2, \delta_3) g(\gamma_1, \gamma_2) \\ I_R &= 100 \quad \text{si } \delta \gamma > 1 \end{aligned} \quad (43)$$

A partir de todas las variables definidas se obtiene, mediante el modelo de cálculo descrito en los apartados anteriores, los valores de δ_1 , δ_2 , δ_3 , γ_1 y γ_2 y las funciones f y g .

Se ha aplicado un factor 100 a la multiplicación para facilitar el análisis de resultados. Por motivos de coherencia, el valor de I_R siempre estará comprendido entre 0 y 100.

En el esquema de la figura 22 se resume el cálculo global del índice I_R . Se indican en el esquema los datos de entrada (relativos a la infraestructura), la variable (velocidad) y el resultado final obtenido I_R .

Fig. 22. Esquema global de cálculo



Fuente: Elaboración propia

Programación

Toda la metodología expuesta en el esquema ha sido implementada dentro de una hoja informática de cálculo. En ella se introducen las características propias de la infraestructura así como las condiciones climáticas (días de lluvia) a las que se ve expuesta. Una vez introducidos los datos de entrada, se teclea el valor de la velocidad en km/h. La hoja de cálculo devolverá el valor de I_R asociado a la velocidad tecleada.

En muchos casos interesará conocer cómo varía el índice de riesgo I_R en función de la velocidad. Para no teclear constantemente los valores de la velocidad para los que se quiere calcular I_R , se ha programado un código en lenguaje Visual Basic que hace variar el valor de la velocidad entre dos extremos establecidos. Se obtienen así dos columnas: una con el rango de velocidades establecido y otra con el valor del I_R asociado a cada velocidad. A partir de estas columnas se puede fácilmente dibujar la gráfica de $I_R = f(v)$, gráfica que ayudará durante el análisis e interpretación de los resultados.

Por otra parte, la ventaja de esta metodología es que se adapta a cualquier tipo de tramo de carretera interurbano. Simplemente cambiando los datos de entrada, se definen las características del tramo a analizar. El código de programación en Visual Basic puede consultarse en el anejo 2.

3.2.8 Análisis crítico

Toda la metodología desarrollada para obtener el índice de riesgo I_R ha sido argumentada ampliamente a lo largo de todos los apartados anteriores. Cabe recordar que el índice I_R debe considerarse como un indicador del riesgo a sufrir una salida de vía debido a las características de la infraestructura y nunca como una probabilidad en su sentido estricto. Según el valor que adopte I_R , el tramo de estudio presentará unas condiciones más o menos buenas de seguridad. Cuanto menor sea su valor, mejores prestaciones tendrá la carretera (menor riesgo). En cambio, cuanto mayor sea el índice I_R (más próximo a 100), la seguridad durante la conducción se verá más comprometida y la posibilidad de salirse de la vía será más alta.

El modelo propuesto es muy completo, ya que considera elementos que afectan a diversos factores de la carretera (diseño de las curvas, dimensiones de la plataforma y estado del pavimento) y, además, implementa factores correctivos que convierten a I_R en un indicador más preciso y global.

Si nos adentramos en los cálculos parciales realizados en el modelo, uno se da cuenta que algunos de ellos tienen una justificación físico-matemática bien argumentada mientras que otros pecan por ser algo intuitivos. Esto es debido a que existe una literatura mucho más extensa con respecto a algunos factores (por ejemplo la seguridad al trazar las curvas) que con respecto a otros (el estado del pavimento). Hay que remarcar, por lo tanto, que el

modelo desarrollado se debe considerar como una primera propuesta que puede ser variada cuando existan más datos. Se deja para estudios posteriores el análisis concreto de estos cálculos con poca argumentación científica.

No obstante, aquello que se tendría que valorar por encima de todo es la obtención de un indicador de riesgo global que es válido, fiable, práctico y, además, polivalente ya que el modelo propuesto permite evaluar cualquier tipo de carretera interurbana con un carril por cada sentido de circulación.

3.3 DETERMINACIÓN DEL INDICADOR DE GRAVEDAD I_G

3.3.1 Antecedentes

El problema de la seguridad, en lo que concierne al transporte, radica fundamentalmente en la lesividad causada por la energía cinética que llevan el vehículo y el conductor en movimiento, y que se libera en el momento del impacto. A mayor velocidad, por lo tanto, mayores son las consecuencias físicas del accidente. Debe tenerse en cuenta que las fuerzas a las que se somete el cuerpo humano en un impacto son directamente proporcionales a la energía liberada, y constituyen la causa directa de la lesividad, o incluso la muerte cuando se supera el límite biomecánico o capacidad de resistencia de las distintas partes de cuerpo.

Las carreteras pueden y deben ser diseñadas para evitar accidentes y, en su defecto, para atenuar las consecuencias evitando lesiones mortales. En una colisión, la biomecánica determina de qué modo el cuerpo humano absorbe la energía desprendida en un accidente (éste no sobrevive habitualmente a impactos directos por encima de los 40 km/h). Los vehículos absorben parte de la energía que interviene en un accidente, pero al mismo tiempo impactan contra elementos constructivos de la vía y/o obstáculos en su inmediatez. Si la infraestructura está construida con elementos de seguridad que absorben la energía cinética del vehículo, las posibilidades de supervivencia de sus ocupantes aumentan. Ambos -vehículo e infraestructura- deben actuar conjuntamente para amortiguar las consecuencias de un accidente y minimizarlo al máximo.

En este apartado se explica la metodología propuesta para evaluar la protección pasiva existente en el tramo que se esté analizando. Se tiene en cuenta únicamente la que se refiere al accidente por salida de vía, que es el accidente en el que se centra este estudio. Se hará uso del protocolo RPS desarrollado por el consorcio EuroRAP, cuyos resultados han sido validados por varias agencias automovilísticas de todo el mundo. Análogamente a la metodología propuesta para llegar al indicador I_R , en ésta se obtendrá un indicador de protección pasiva frente a los accidentes por salida de vía. A este indicador se le nombra índice de gravedad I_G .

3.3.2 Metodología de cálculo

El cálculo RPS de EuroRAP ha sido aplicado desde el año 2001 en muchos países europeos y sus fundamentos han servido para desarrollar protocolos similares fuera de Europa (básicamente Estados Unidos y Australia). Sus bases de cálculo están explicadas en el apartado 2.3.3 de la tesina.

La protección pasiva, con respecto a los accidentes por salida de vía, tiene en cuenta básicamente la presencia o ausencia de barreras de seguridad y la distancia existente entre el extremo exterior del carril (inicio del arcén) y el elemento rígido más cercano. Cuanto mayor sea esta distancia, mejor valoración obtendrá el tramo de estudio. Como en el caso del índice de riesgo I_R , el I_G está ligado a la velocidad de circulación. A velocidades más altas, las exigencias en términos de protección serán mayores (mirar anejo 1).

3.3.2.1 Aplicación del protocolo RPS

La metodología propuesta para obtener el índice de gravedad I_G se basa en el protocolo de cálculo RPS de EuroRAP. No se ha calcado exactamente el protocolo, sino que se ha intentado adaptar el cálculo al estudio y mejorar algunos aspectos concretos.

El cálculo original de EuroRAP únicamente considera la posibilidad de que el elemento rígido se sitúe dentro de 4 rangos posibles (tabla 4). En este estudio se ha ampliado en uno los rangos posibles, ya que no parecían suficientes. Por otra parte, a partir de los datos del anejo 1 se han calculado mediante una aproximación por mínimos cuadrados las curvas que se adaptan a estos valores. De esta manera, se han obtenido las siguientes funciones para cada rango considerado. Se detalla al lado de cada función el valor del coeficiente de determinación respectivo.

$$\begin{aligned}
 0 \leq d \leq 1 &\rightarrow y_1 = 0,0147v^2 - 1,4886v + 37,439 & R^2 &= 0,9997 \\
 1 < d \leq 3 &\rightarrow y_2 = 0,0075v^2 - 1,6263v + 11,985 & R^2 &= 0,9995 \\
 3 < d \leq 7 &\rightarrow y_3 = 0,0026v^2 - 1,1108v - 1,6061 & R^2 &= 0,9995 \\
 7 < d \leq 10 &\rightarrow y_4 = 1 + 7/80 \cdot (v - 60) & R^2 &= 1
 \end{aligned} \tag{44}$$

Como se observa, los valores de R^2 son tan altos que los valores de las funciones aproximadas se tomarán como validos sin lugar a dudas.

En el caso en que la distancia hasta el elemento rígido supere los 10 metros o que exista una barrera de seguridad en los laterales de la vía la protección pasiva adquiere su mejor puntuación independientemente de la velocidad de circulación.

$$\begin{aligned}
 d > 10 &\rightarrow y_5 = 1 \\
 barrera &\rightarrow y_6 = 1
 \end{aligned} \tag{45}$$

Factor correctivo

El protocolo RPS considera, además de la distancia hasta el elemento rígido más cercano, la pendiente existente entre éste y la plataforma. Este valor de la pendiente funciona como un factor de corrección que empeora el valor de la protección cuanto más pronunciada sea la pendiente decreciente.

El motivo fundamental de aplicar este factor correctivo es que la pendiente decreciente aumenta la aceleración del vehículo y produce, por lo tanto, una disminución de la distancia hasta el elemento rígido dado que se requiere una distancia mayor para conseguir detener el vehículo. El factor correctivo funciona con un cambio en la asignación de las funciones y . Según la pendiente del terraplén, la función escogida para evaluar el valor de la protección variará. En la siguiente tabla, se muestra con claridad lo hasta ahora explicado:

Tabla 32. Asignación de la función y para diferentes inclinaciones del terraplén

	Inclinación del terraplén			
	$p=0$	$p \leq 1/7$	$1/7 < p < 1/3$	$p \geq 1/3$
Distancia d	0-1 (y_1)	\rightarrow (y_1)	\downarrow (y_1)	$\downarrow \downarrow$ (y_1)
	1-3 (y_2)	\rightarrow (y_2)	\downarrow (y_1)	$\downarrow \downarrow$ (y_1)
	3-7 (y_3)	\rightarrow (y_3)	\downarrow (y_2)	$\downarrow \downarrow$ (y_1)
	7-10 (y_4)	\rightarrow (y_4)	\downarrow (y_3)	$\downarrow \downarrow$ (y_1)
	>10 (y_5)	\rightarrow (y_5)	\downarrow (y_4)	$\downarrow \downarrow$ (y_1)

Fuente: Elaboración propia-EuroRAP

Como se aprecia en la tabla de asignaciones, cuanto mayor sea la pendiente del terraplén, la distancia hasta el elemento se verá más reducida. Si, en cambio, la pendiente es nula o bien positiva la función permanece constante. Para pendientes poco pronunciadas ($p \leq 1/7$), no existe cambio alguno en la asignación porque se considera que la inclinación es nula. Si la pendiente se sitúa entre $1/3$ y $1/7$, se penaliza este caso reduciendo en un rango la función y_i . En el caso en que la pendiente esté por encima de $1/3$, una salida de vía provocará inevitablemente el vuelco del vehículo (referencias). Se asigna entonces la función más crítica (y_1).

Elementos rígidos

Durante la descripción del modelo se ha nombrado varias veces el concepto de elemento rígido. Hace falta definir con precisión este concepto para no dar lugar a dudas durante la inspección de la carretera a estudiar.

Un elemento rígido es cualquier cuerpo u objeto que tras un choque directo detenga al vehículo instantáneamente. Es decir, se trata de un elemento que no absorbe la energía cinética que llevan conductor y vehículo. Una barrera de seguridad no se puede considerar, por lo tanto, un elemento rígido, ya que ésta se deforma para amortiguar el choque.

Existen infinidad de tipologías de elementos rígidos en las carreteras. De entre todos, se ha escrito un listado de los que se encuentran más habitualmente:

Tabla 33. Listado de elementos rígidos presentes en los laterales de la carretera

Elementos rígidos habituales
<ul style="list-style-type: none"> - árboles - obras de cemento - pilares de puentes - tuberías de drenaje - arquetas - cunetas trapezoidales (las triangulares permiten volver a la carretera) - postes de tendido eléctrico - taludes rocosos - muros de casas

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Cálculo de I_G

El cálculo del valor de I_G se realiza a partir de las ecuaciones 44 y 45 y de la tabla correctiva 32. Los datos de entrada son la distancia hasta el elemento rígido (distancia entre el final del carril y el elemento en cuestión) y la pendiente del terraplén asociada. Es de esperar que esta distancia y pendiente vayan variando a lo largo del tramo analizado. Se deberán anotar, entonces, las longitudes de las secciones afectadas por cada distancia.

Una vez conocidos los datos de entrada, el cálculo de I_G es directo. Su formulación es la siguiente:

$$I_G = \frac{l_1}{l_{tot}} \left\{ \frac{y_1}{y_1} + \frac{l_2}{l_{tot}} \left\{ \frac{y_2}{y_1} + \frac{l_3}{l_{tot}} \left\{ \frac{y_3}{y_1} + \frac{l_4}{l_{tot}} \left\{ \frac{y_4}{y_1} + \frac{l_5}{l_{tot}} \left\{ \frac{y_5}{y_1} + \frac{l_6}{l_{tot}} y_6 \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. ; \quad l_{tot} = \sum_{i=1}^6 l_i \quad (46)$$

Las ramificaciones indican la posible asignación de la función y , que depende de la pendiente del terraplén lateral de la carretera. Las longitudes l_i son las longitudes asociadas a la distancia y_i (en llano).

Todo el cálculo del índice se ha realizado a partir de una hoja de cálculo.

Hay que destacar que el índice I_G es totalmente independiente al I_R . Mientras que el último valora la bondad de la infraestructura para evitar la generación de accidentes, el índice I_G evalúa la protección de la carretera una vez producido el accidente. Por último, para evaluar el I_G se debe partir de una velocidad mínima de 60 km/h. El valor de I_G se mueve entre 1 (mínimo) hasta ∞ . Cuanto mayor sea el valor de I_G , peor será la protección pasiva del tramo analizado.

3.3.4 Ejemplo de cálculo

En la tabla siguiente se da un ejemplo de cálculo del indicador de gravedad I_G para un tramo teórico de carretera y para distintas velocidades de circulación.

Tabla 34. Ejemplo de cálculo

Protección pasiva								
	Distancia d (m)	Longitud (m)			Pendiente		Asignación	
INPUT	$0 \leq d \leq 1 \rightarrow I_1$	0			-		-	
	$1 < d \leq 3 \rightarrow I_2$	100			0		$\rightarrow y_2$	
	$3 < d \leq 7 \rightarrow I_3$	500			1/5		$\downarrow y_2$	
	$7 < d \leq 10 \rightarrow I_4$	1100			1/5		$\downarrow y_3$	
	$10 < d \rightarrow I_5$	0			-		-	
	barrera $\rightarrow I_6$	300			-		$\rightarrow y_6$	
v (km/h)		60	70	80	90	100	110	120
$I_G (1 - \infty)$		1	3	6	10	15	20	26

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Asignación de estrellas

Como ya se explicó en el apartado 2.3.3, el cálculo RPS asigna en su fase final un número de estrellas que pueden variar entre una y cuatro estrellas en función la valoración en protección pasiva. Esta asignación se efectúa dependiendo del resultado de I_G tal y como se muestra en la tabla 35.

Tabla 35. Asignación de estrellas

Índice de gravedad	Asignación de estrellas	Protección
$I_G < I_1 = 3$	****	Máxima
$3 = I_1 < I_G < I_2 = 6$	***	Elevada
$6 = I_2 < I_G < I_3 = 14$	**	Media
$14 = I_3 < I_G$	*	Deficiente

Fuente: EuroRAP

Los valores de I_G que marcan la frontera (I_1, I_2 y I_3) han sido proporcionados por la Fundación RACC (European road assessment core programme, 2004) y se utilizarán en el capítulo 4 para proponer una velocidad límite adecuada.

3.3.6 Análisis crítico

La metodología utilizada para calcular el índice de gravedad I_G es completa y ha sido utilizada y validada por varias administraciones de carreteras en toda Europa. Esta metodología es la primera y única que se ha propuesto para evaluar la protección pasiva de las carreteras.

Históricamente, a la protección pasiva no se le ha dado toda la importancia que se merece y aún hay países europeos cuyas carreteras ofrecen una protección de este tipo deficiente. En aquellos, donde en cambio, las administraciones titulares de carreteras se esfuerzan por mantener la protección pasiva en su nivel más alto, las estadísticas de siniestralidad son significativamente menores. La carretera no sólo debe estar diseñada para evitar accidentes (protección activa), sino que tiene que estar preparada para soportarlos y proteger al conductor en el caso de que ocurran. Aquí entra en juego el indicador I_G , para considerar la protección pasiva y no apartarla hasta una posición poco relevante.

Centrándose en los datos en los que se basa el protocolo RPS (que es equivalente al cálculo de I_G), únicamente se puede criticar un aspecto. Los estudios en los que se basa el protocolo RPS están protegidos y no pueden ser consultados por miembros ajenos al consorcio EuroRAP. Por lo tanto, los valores dados en el anejo 1 no han podido ser validados ni comprobados. No obstante, dado que este cálculo se ha aplica desde hace varios años en las carreteras europeas y que sus resultados son satisfactorios, se asume la validez de los datos.

4 REDEFINICIÓN DE LA VELOCIDAD LÍMITE

4.1 INTRODUCCIÓN

La velocidad límite en carreteras se ha fijado normalmente siguiendo criterios con poca consistencia científica basados en argumentos convencionales y ha sido promovida muchas veces según motivaciones políticas. El objetivo de este capítulo es el de proponer una metodología dotada de unas pautas científicas que permita redefinir una velocidad límite adecuada en la carretera atendiéndose únicamente a las características de la infraestructura. Esta metodología ofrece un rigor matemático a la fijación de la velocidad límite.

El método de trabajo parte de los dos indicadores definidos en el capítulo anterior (I_R e I_G). A partir del valor de estos indicadores se comprueba si el límite de velocidad actual es o no el adecuado. Si no lo es, se propone una disminución o aumento de la velocidad límite hasta cierto valor que suponga un riesgo y protección óptimos.

Hay que remarcar que la fijación de la velocidad límite aquí propuesta es independiente del historial de siniestros ocurridos en la carretera analizada. La metodología únicamente atiende a las características de la infraestructura. Las estadísticas de accidentes y de muertos o heridos graves en la carretera solamente se utilizarán durante la fase de validación del modelo (capítulo 5). Se espera que en aquellos tramos donde el índice de riesgo es alto, los accidentes también lo sean y que, en los que el valor de la protección es deficiente, el porcentaje de accidentes mortales o graves con respecto a los accidentes totales sea relativamente alto.

4.2 CREACIÓN DE SUBGRUPOS

Con la intención de facilitar el análisis de los indicadores definidos en el capítulo anterior se han creado rangos o subgrupos de valoración para el indicador I_R . Para el indicador de protección I_G no ha sido necesario crear estos subgrupos porque ya se realizó durante la asignación de estrellas propuesta por EuroRAP.

Recordando lo explicado en el apartado 3.3.5, a partir del resultado final de I_G , el protocolo RPS asigna al tramo de estudio un número de estrellas que varía entre una y cuatro. Se definen así cuatro rangos que dan una valoración de la protección pasiva en función del resultado de I_G :

Tabla 36. Valoración de la protección

Índice de gravedad	Asignación de estrellas	Protección
$I_G < I_1=3$	****	Máxima
$3= I_1 < I_G < I_2=6$	***	Elevada
$6= I_2 < I_G < I_3=14$	**	Media
$14= I_3 < I_G$	*	Deficiente

Con el indicador I_R también interesa obtener una valoración de los factores activos de la carretera similar a la propuesta por EuroRAP con el I_G . Para ello, es necesario definir unos valores límite de I_R que actúen como frontera de los distintos subgrupos. Se ha considerado aconsejable la subdivisión en tres rangos de valoración del riesgo. Estos son:

Tabla 37. Valoración del riesgo

Índice de riesgo	Riesgo
$I_R < I_A$	Mínimo
$I_A < I_R < I_B$	Aceptable
$I_B < I_R$	Elevado

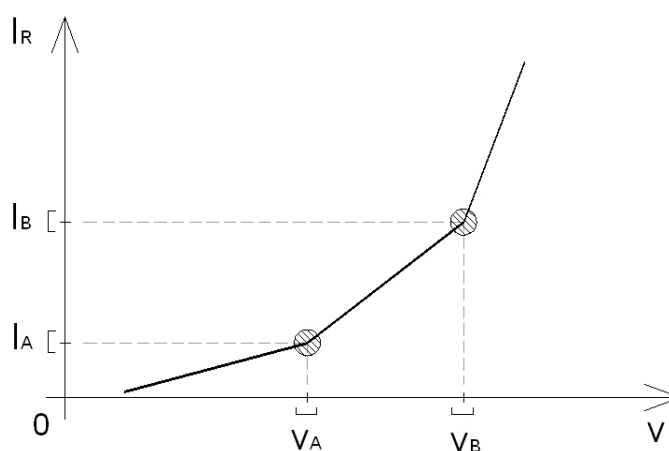
Fuente: Elaboración propia

I_A e I_B son, respectivamente, los valores límite nombrados. La obtención de estos valores no es trivial ni arbitraria. Para su determinación se han lanzado varios cálculos de casos teóricos que pueden ser consultados en el anejo 3.

Cada cálculo teórico considera varias tipologías de carretera de características estándar. Después de un análisis exhaustivo y de una interpretación de los resultados de estos casos teóricos, se han considerado unos valores de I_A e I_B de 5 y 15 respectivamente. Estos valores son los mismos para cada tipología de carretera. No se ha contemplado la posibilidad de que I_A e I_B fueran diferentes dependiendo de la tipología de carretera que se analiza, porque esto implicaría que se asumirían riesgos distintos al circular por carreteras diferentes.

La subdivisión en tres rangos de valoración para el índice de riesgo ha venido motivada por la forma de las gráficas del anejo 3. Todas las gráficas repiten una tendencia simulada en la figura 23.

Fig. 23. Tendencia gráfica de I_R



Fuente: Elaboración propia

La forma de la función deja intuir que se pueden crear tres rangos de valoración para el indicador I_R . En realidad, esta forma con dos puntos de discontinuidad tiene su explicación en el esquema de cálculo seguido para obtener el indicador de riesgo del capítulo anterior (apartado 3.2). Es la incorporación de un nuevo elemento parcial de evaluación δ_i la que provoca un aumento del riesgo a sufrir un accidente, que se refleja con una subida de la pendiente de la función.

4.3 DIAGRAMA DE VELOCIDADES

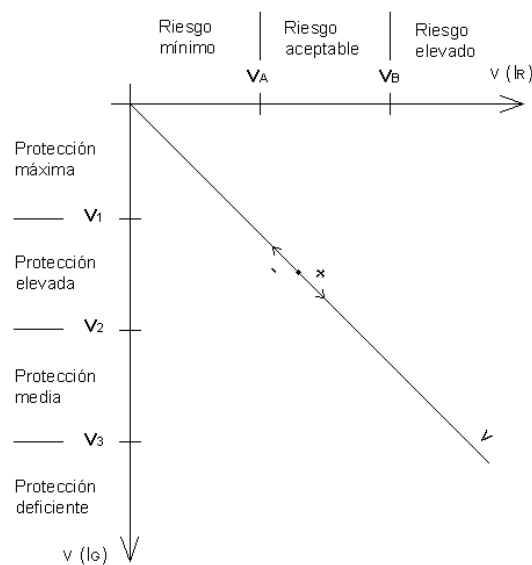
Los indicadores I_R e I_G están directamente relacionados con la velocidad de circulación. Por lo tanto, el razonamiento realizado en el apartado anterior puede aplicarse en las velocidades. Es decir, como el valor de cada indicador esta asociado a una velocidad, se puede saber si una velocidad de circulación concreta supone un riesgo mínimo, aceptable o elevado con respecto al indicador de riesgo, o bien una protección máxima, elevada, media o deficiente en el caso del indicador de gravedad.

En cada tramo de carretera analizado, los índices límite I_1 , I_2 , I_3 , I_A e I_B tendrán asociados unas velocidades límite v_1 , v_2 , v_3 , v_A y v_B concretas y distintas para cada tramo. Se trata, de hecho, de efectuar el camino en sentido opuesto al descrito en el capítulo 3. Si antes se calculaba el valor de I_R e I_G en función de la velocidad de circulación, ahora se determinan las velocidades límite a partir de los valores frontera I_1 , I_2 , I_3 , I_A e I_B . Esto es:

$$\begin{aligned} v_i &= f_i(I_i) & i &= 1, 2, 3 \\ v_j &= f_j(I_j) & j &= A, B \end{aligned} \quad (47)$$

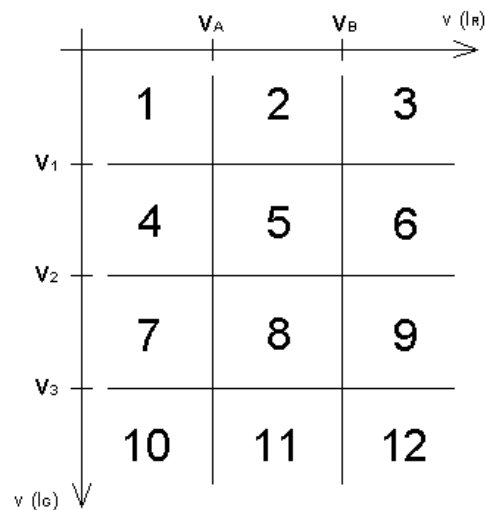
La fijación de la velocidad límite debe considerar tanto al factor de riesgo como al de gravedad. Para poder trabajar con los dos elementos conjuntamente se ha creado un diagrama de velocidades en el que ambos tienen representación. En él, el eje horizontal marca la velocidad relacionada con el riesgo a sufrir un accidente y el vertical representa las velocidades referidas a la protección de la vía. Ambos ejes están en la misma escala e incorporan los valores de las velocidades frontera v_A , v_B y v_1 , v_2 , v_3 .

En el diagrama (figura 24), la línea diagonal representa el cambio en la velocidad de circulación. A medida que nos desplazamos hacia la derecha, vamos entrando en regiones de riesgo y de protección cada vez más comprometidas desde el punto de vista de la seguridad. Asimismo, si la velocidad va disminuyendo (dirección izquierda), el riesgo a salirse de la vía y la gravedad del posible accidente decrece.

Fig. 24. Diagrama de velocidades

Fuente: Elaboración propia

Dentro del diagrama de velocidades, las velocidades límite de cada eje definen doce regiones o celdas. Cada una de ellas tiene una valoración conjunta de riesgo y de gravedad del accidente.

Fig. 25. Creación de celdas

Fuente: Elaboración propia

El tamaño de las celdas y el valor de las velocidades frontera variarán en cada tramo de carretera. Esto es lógico ya que tanto v_1 , v_2 y v_3 como v_A y v_B dependen de las características físicas de la carretera; características que van variando tramo a tramo.

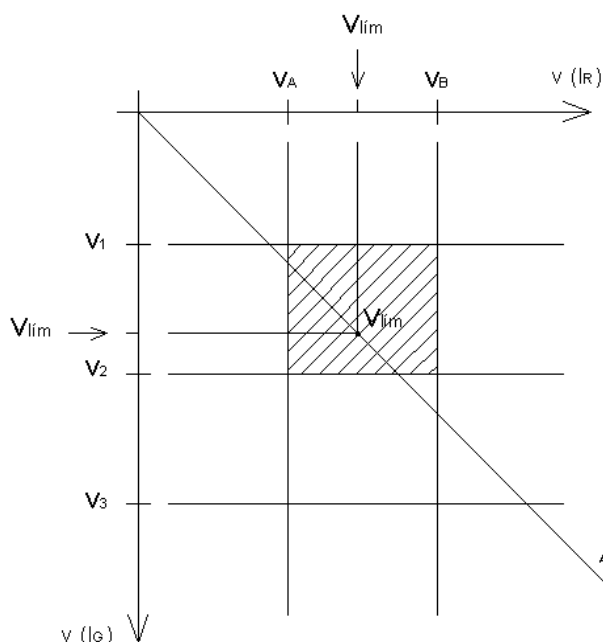
La creación de las doce celdas de valoración conjunta son el punto de partida para definir una velocidad límite adecuada en cada tramo analizado, y se explica en el siguiente apartado.

4.4 FUNCIÓN OBJETIVO DE LAS CELDAS

Este apartado describe las recomendaciones para redefinir la velocidad límite de una carretera. Supone, pues, la última fase del estudio.

El límite de velocidad actual (inicial) se sitúa en una de las doce celdas, que tiene asociada una valoración del riesgo y de la protección concreta. Supongamos, por ejemplo, que la velocidad límite actual se sitúa exactamente en la celda nº5:

Fig. 26. Situación de la velocidad límite



Fuente: Elaboración propia

En este caso, la celda nº5 implica un riesgo a sufrir una salida de vía aceptable (riesgo relativamente bajo) y una protección pasiva de la carretera elevada (gravedad del accidente baja).

Básicamente, la metodología propuesta consiste en asignar una función objetivo a cada una de las doce celdas definidas en el diagrama de velocidades. La función lleva asociada una actuación concreta que depende de la política en seguridad vial adoptada por parte de la administración titular de carreteras.

Aquí se propone una política en seguridad estricta basada en tres principios fundamentales:

1. No se puede permitir que el límite de velocidad se sitúe dentro de una región que suponga un riesgo elevado a sufrir un accidente ($V_{\text{lím}} < v_B$).
2. No se puede permitir que el límite de velocidad se sitúe dentro de una región que implique un riesgo alto de morir o quedar malherido si se produce un accidente ($V_{\text{lím}} < v_3$).
3. En la medida de lo posible, el límite de velocidad debe situarse en la frontera que separa la zona de riesgo aceptable para el conjunto de la sociedad de la que es demasiado elevada ($V_{\text{lím}} \approx \min(v_2, v_B)$).

Definidos ya los principios seguidos por la política vial adoptada, sólo queda dar a conocer las actuaciones recomendadas para cada celda. En la tabla 38 se da una valoración de la situación de seguridad en la que se encuentra cada celda y se propone un nuevo límite de velocidad en concordancia con los tres principios anteriores.

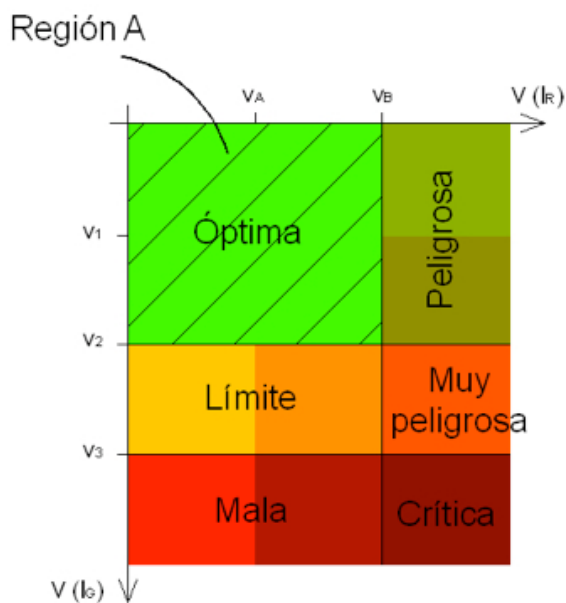
Tabla 38. Redefinición de la velocidad límite y recomendaciones

Posición de $V_{\text{lím_inicial}}$		Situación de seguridad	Redefinición de $V_{\text{lím}}$
Región A	1 2 4 5	Óptima	$\uparrow V_{\text{lím}}$ hasta $\min(v_B, v_2)$
	7 8	Límite	$\equiv V_{\text{lím}} = V_{\text{lím_inicial}}$
	10 11	Mala	$\downarrow V_{\text{lím}}$ hasta v_3
	3 6	Peligrosa	$\downarrow V_{\text{lím}}$ hasta v_B
	9	Muy peligrosa	$\downarrow\downarrow V_{\text{lím}}$ hasta v_B
	12	Crítica	$\downarrow\downarrow\downarrow V_{\text{lím}}$ hasta $\min(v_B, v_3)$

Fuente: Elaboración propia

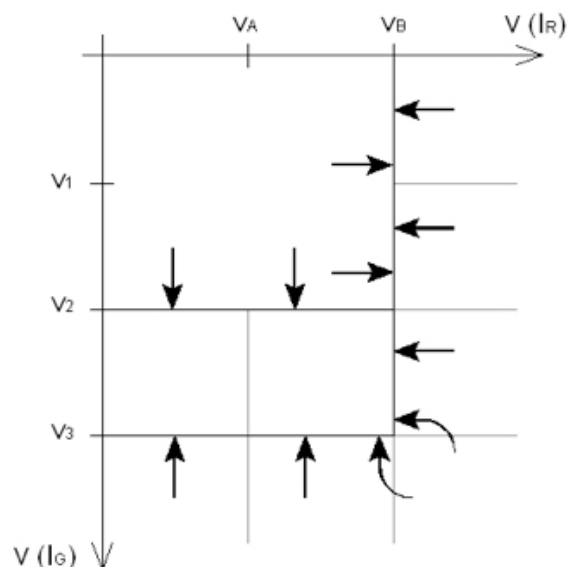
El contenido de la tabla anterior es fruto de un razonamiento gráfico que se muestra a continuación:

Fig. 27. Situación de seguridad



Fuente: Elaboración propia

Fig. 28. Redefinición de la velocidad límite



Fuente: Elaboración propia

Región A

En el caso en que la velocidad límite actual se encuentre dentro de la región A (celdas 1, 2, 4 y 5), se recomienda una subida de la velocidad límite. Esto es debido a que las condiciones de la vía son tan buenas que se pueden desarrollar velocidades mayores a las hasta ahora permitidas sin que ello comprometa la seguridad de los usuarios de la carretera.

No es infrecuente toparse con carreteras de este tipo al circular por vías españolas y, en cierta medida, suponen un problema ya que algunos conductores rebasarán la velocidad máxima permitida mientras que otros no, lo que derivará en una diferencia de velocidades entre vehículos. Si este diferencial de velocidades dentro del flujo de la circulación es significativo se pueden ocasionar situaciones de riesgo que, a la larga, se traducen en un mayor número de accidentes. Por lo tanto, se espera que ampliando el límite de velocidad en estos casos, los resultados en cuanto a la seguridad vial sean beneficiosos.

Como el aumento de la velocidad límite es una medida que difícilmente es aceptada por las administraciones titulares de carreteras, en algunos países europeos como en Holanda, se aplican programas que fomentan la adaptación del diseño de las carreteras con respecto a su límite de velocidad. Por ejemplo, bajo la aplicación del programa Sustainable Road Safety

(descrito en el apartado 2.2.2), se han reducido las dimensiones del carril de algunas carreteras holandesas para originar una disminución de la velocidad por parte del conductor y que, de esta manera, los límites de velocidad impuestos sean indirectamente más creíbles (Dutch Ministry of Transport, 2005).

Otras regiones

En el caso en el que la velocidad límite actual no se sitúe dentro de la región A, se recomienda bajar el valor del límite de velocidad porque se considera que el riesgo a sufrir un accidente o bien las consecuencias de este son demasiado graves para la actual velocidad. Únicamente en las celdas 7 y 8 no es necesario rebajar la velocidad límite ya que su valoración de seguridad se encuentra entre el límite de lo seguro y lo inseguro.

Además de proponer una velocidad límite adecuada para cada celda, se ha pensado en las actuaciones que deberían adoptarse sobre la infraestructura de la carretera para poder recuperar la velocidad límite inicial. Básicamente, se trata de adaptar la infraestructura con el objetivo de hacer variar las velocidades límite (v_1 , v_2 , v_3 , v_A , v_B) de manera que la velocidad límite inicial se sitúe en las celdas “convenientes”.

Se da a continuación un listado de las actuaciones recomendadas para cada celda del diagrama:

- Celdas 3 y 6: Mejorar el diseño de la vía (factores activos) para desplazar la velocidad límite v_B hacia la derecha hasta que $v_B = V_{\text{lim_inicial}}$.
- Celdas 7 y 8: Mejorar la protección de la vía (factores pasivos) para desplazar la velocidad límite v_2 hacia abajo hasta que la velocidad límite salte a la celda superior (Región A).
- Celda 9: Mejorar las prestaciones de diseño de la vía para que $v_B = V_{\text{lim_inicial}}$. Si $v_B < v_2$, la velocidad límite se encontrará dentro de la región A y no hará falta ninguna actuación más. Si, en cambio, $v_B > v_2$, la velocidad límite habrá pasado a la celda 8 y habrá que actuar como se recomienda en tal caso (mejorando los factores pasivos).
- Celdas 10 y 11: Mejorar la protección de la vía hasta situarse en la región óptima A. Es decir, aumentar el valor de v_2 hasta que $v_2 = V_{\text{lim_inicial}}$.
- Celda 12: Mejorar tanto las prestaciones de protección como las de diseño hasta llegar a la región A.

4.5 APLICACIONES

Redefinición de la velocidad límite de una carretera

La fijación de la velocidad límite descrita únicamente tiene en cuenta un tramo concreto de carretera de entre aproximadamente 5 y 20 km. Como cada tramo presentará unas características distintas, la velocidad límite adecuada será diferente a lo largo de toda la carretera. Se requiere, por lo tanto, un tratamiento global de todos los tramos de la carretera que se adapte a todas las secciones para encontrar una velocidad límite única.

Normalmente, como las características de una carretera son homogéneas en su longitud, la velocidad límite no variará mucho entre sección y sección. Por lo tanto, una manera de determinar la velocidad límite global es ponderando su valor en función de la longitud de cada tramo:

$$V_{lim} = \sum_{i=1}^n \frac{long.tramo_i}{long.total} V_{lim_tramo_i} \quad (48)$$

Por otra parte, podría darse el caso en el que alguno de los tramos de la carretera tuviese una velocidad límite que difiriese considerablemente de la de sus vecinas. Es conveniente, en ese caso, no considerar su peso dentro de la ecuación 48. No obstante, habría que señalar a conciencia este tramo e intentar modificar sus características para que entre en concordancia con los tramos adyacentes.

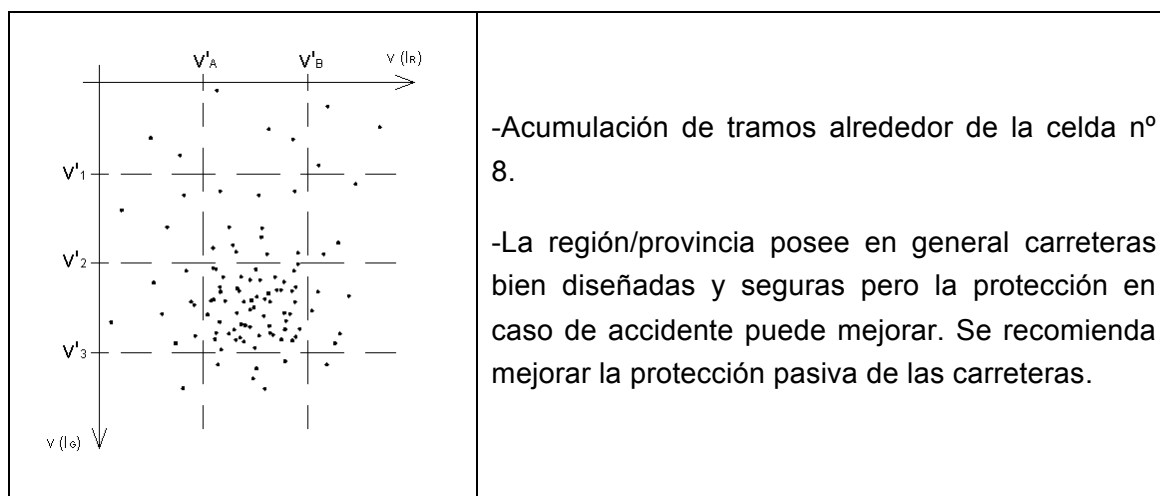
Estudio regional del estado de las infraestructuras viarias

Otra aplicación adicional que se puede extraer del análisis de las celdas es la de poder realizar una evaluación general del estado de las carreteras de una región o provincia.

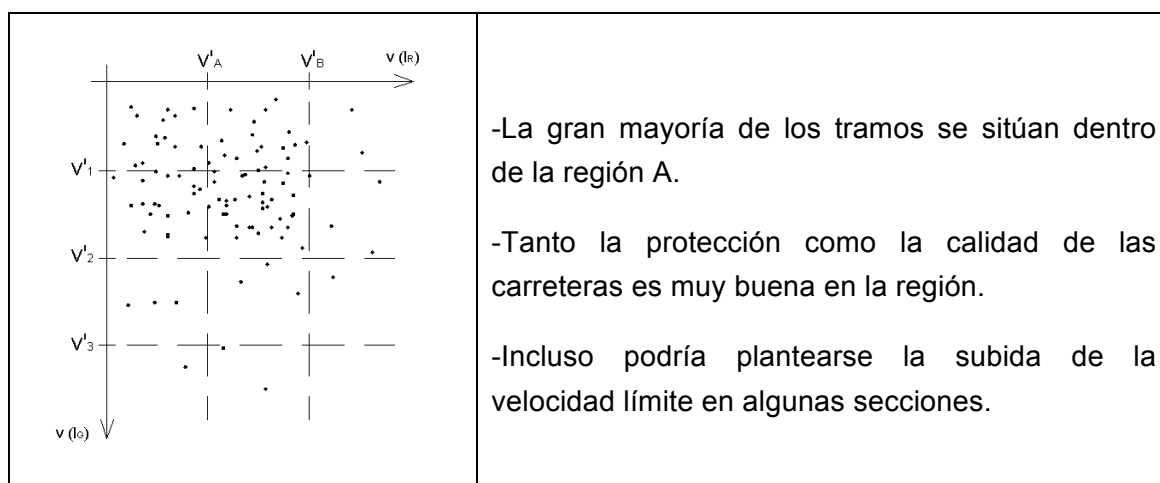
Para ello, se deben evaluar todos los tramos de sus carreteras y ver en qué celdas se sitúan sus velocidades límite actuales. Se trata, después, de comprobar si hay celdas que están más densamente repetidas y extraer de aquí algunas conclusiones e interpretaciones.

A continuación, se dan tres ejemplos posibles y su interpretación lógica. Las figuras expuestas simplemente muestran una manera práctica de representar los resultados. En realidad, cada tramo tiene asociado unos valores de las velocidades frontera v_1 , v_2 , v_3 , v_A y v_B distintos. Por lo tanto, no se pueden representar conjuntamente en una gráfica. En cambio, sí se puede estudiar cuáles son las celdas que más se repiten y así interpretar los resultados.

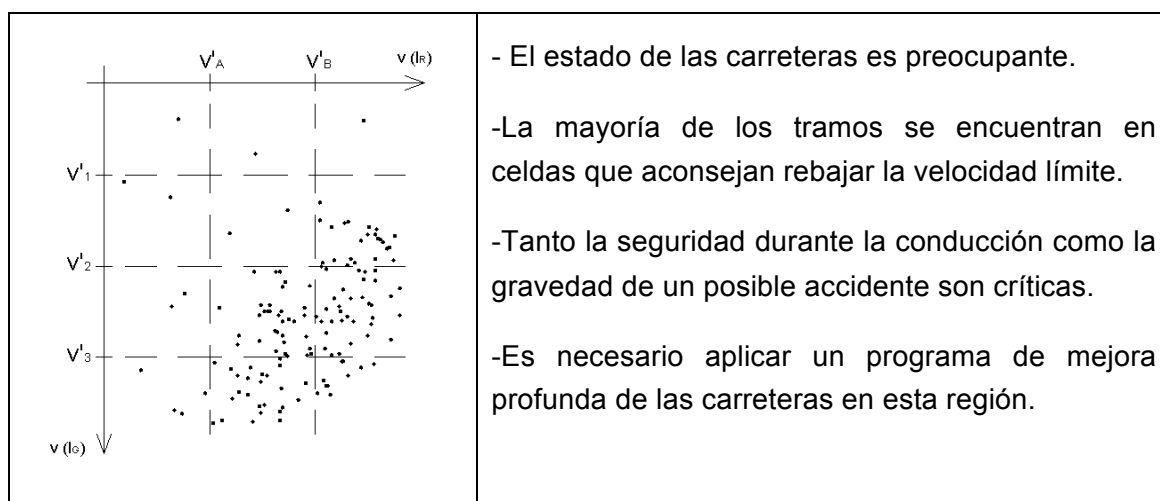
Caso 1:



Caso 2:



Caso 3:



4.6 CONCLUSIONES

La legislación adoptada por las administraciones en cuanto a la fijación de la velocidad límite es cuestionada por la razón científica, que no puede aceptar argumentos convencionales y poco rigurosos como válidos. La velocidad de operación del tráfico responde a unos principios científicos y a unos condicionamientos técnicos y nunca funciona arbitrariamente.

La recomendación dada en este capítulo sobre la fijación de la velocidad límite en las carreteras es la primera que responde a unas pautas científicas. No obstante, hay que recordar que los indicadores de seguridad I_R e I_G sólo consideran las características de la infraestructura y, dentro de esta, los accidentes debidos a las salidas de vía. Se trata, por lo tanto, de una recomendación parcial que debería ser completada considerando más elementos. De hecho, el cambio en la velocidad límite de una carretera afecta a muchos más factores que el de la accidentalidad. Por ejemplo, el cambio en la velocidad implica una variación de la contaminación ambiental del medio y también una variación en los tiempos de viaje. Es decir, la velocidad límite tiene una afectación global sobre muchos parámetros que en esta tesina no se han podido tener en cuenta. Sería recomendable realizar un análisis preciso del problema que tenga en cuenta estos parámetros para mejorar el modelo propuesto.

Por último, hay que recordar que las recomendaciones propuestas para adoptar una velocidad límite se basan en una política de seguridad vial concreta. Aquí se ha considerado una relativamente restrictiva, pero siempre se puede adoptar otro tipo de política que aplique funciones objetivo diferentes a las celdas. Aun así, la globalidad del método seguirá siendo la misma.

5 VALIDACIÓN Y TRABAJO DE CAMPO

5.1 INTRODUCCIÓN

El modelo propuesto y descrito en los dos capítulos anteriores necesita de una fase de validación para corroborar su buen funcionamiento.

Una de las características fundamentales de este modelo es que no parte de datos de accidentalidad para redefinir la velocidad límite de las carreteras. De hecho, únicamente se basa en las características de la infraestructura viaria para obtener unos resultados. La validación que se propone en este capítulo consiste en demostrar que los resultados obtenidos en el modelo están relacionados con el historial de accidentalidad/siniestros ocurridos en la carretera. Es decir, si después de aplicar el modelo se obtiene que un tramo concreto de carretera es peligroso, las estadísticas de accidentalidad deberían estar acordes con esta valoración.

En el capítulo se ofrecen dos maneras de validar el modelo pero, como se verá durante el desarrollo del tema, la validación de toda la metodología propuesta es difícil y requiere de mucho tiempo. De hecho, es muy complejo validar un modelo que se basa tanto en suposiciones empíricas como en criterios teóricos y que además trata parcialmente a la globalidad de la accidentalidad (se considera únicamente la influencia de la infraestructura en los accidentes por salida de vía).

No obstante, la complejidad de la validación no resta sentido a toda la metodología de cálculo, ya que todos los criterios asumidos durante su desarrollo fueron ampliamente argumentados en los capítulos anteriores. Como, desgraciadamente, no se dispone de los medios ni del tiempo necesario para realizar una validación completa del modelo, se ha llevado a cabo una validación parcial aplicando la metodología de cálculo en un tramo concreto de carretera. De los resultados obtenidos se comprobará que el modelo de redefinición de la velocidad límite propuesto es fiable y se puede aplicar en la carretera.

5.2 VALIDACIÓN TEÓRICA

La manera más directa de validar el modelo de redefinición de la velocidad límite en carreteras es aplicándolo a diferentes secciones de carretera y corroborar su buen funcionamiento.

Se trataría de escoger varios tramos de carretera y obtener los dos indicadores I_G e I_R en cada uno de ellos. Después, se determina la velocidad límite adecuada a partir de estos dos indicadores y se aplica en los tramos escogidos. Finalmente, habría que comprobar que esta nueva velocidad límite produce beneficios en el conjunto de la sociedad. Es decir, si en un tramo se recomienda rebajar la velocidad límite, esto debe traducirse en una disminución de la accidentalidad medible.

El inconveniente fundamental de este tipo de validación es que requiere de unos medios elevados y que obliga a aplicar el modelo en un tramo de prueba antes de que este mismo haya sido validado.

Además, los beneficios en cuanto a la accidentalidad son complicados de medir. Un cambio en la velocidad límite no se ve reflejado instantáneamente en las estadísticas de accidentes. Puede que la variación de la velocidad límite no produzca estos “beneficios” hasta pasados unos cuantos años. Es necesario, por consiguiente, de muchísimo tiempo para aplicar este tipo de validación.

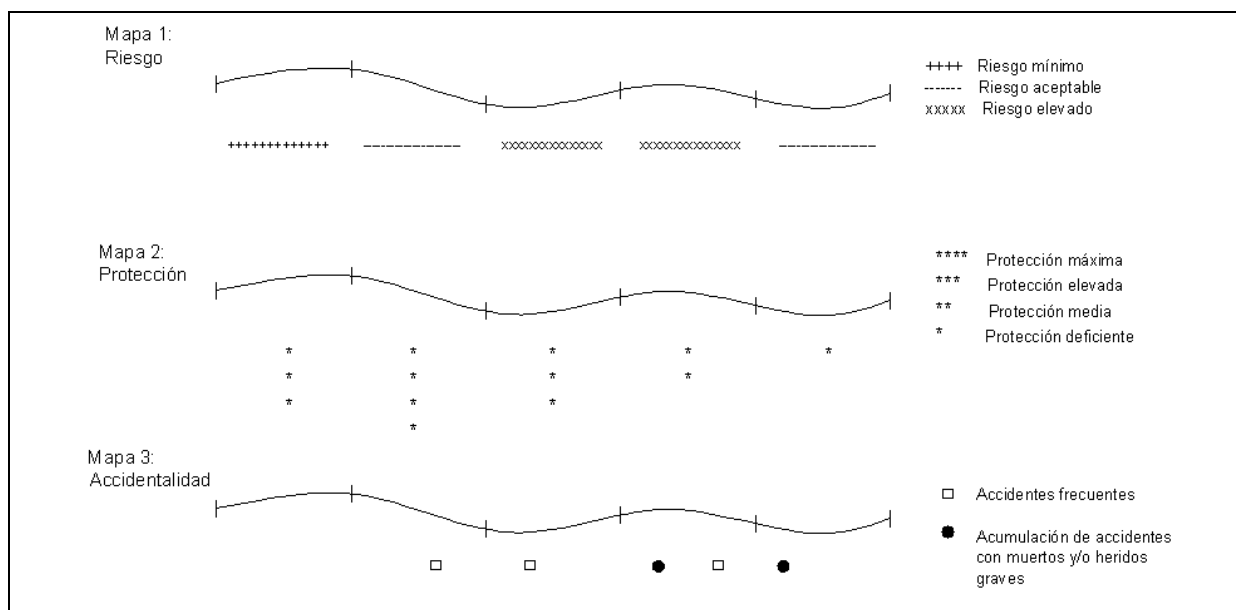
Se propone a continuación un método de validación más sensato y aplicable.

5.3 VALIDACIÓN POR MAPAS

La validación por mapas consiste en comprobar que los indicadores de la infraestructura I_R e I_G tienen una relación directa con las estadísticas de accidentes y siniestros en carretera. Básicamente, se trata de verificar que aquellos tramos en los que se obtiene una valoración de I_R deficiente (riesgo alto a sufrir una salida de vía), se producen más accidentes de este tipo que en tramos con mejor valoración de I_R . Con el indicador I_G , se trataría de comprobar que los accidentes con heridos graves o fallecidos se producen mayoritariamente en secciones de la carretera con una protección pasiva insuficiente (I_G alto).

Una manera de trabajo para poder llevar a cabo esta validación es mediante la superposición de tres mapas de resultados y de su posterior interpretación.

Fig. 29. Superposición de mapas



Fuente: Elaboración propia

El primer mapa muestra los resultados en cuanto al indicador de riesgo I_R sobre una carretera teórica. Éste tiene tres posibles valores que indican la bondad de la carretera para impedir que se produzcan accidentes. Cabe recordar que el indicador de riesgo es dependiente de la velocidad de circulación. El resultado dado en el mapa se calcula considerando que el conductor circula continuamente a la velocidad límite establecida en la carretera.

En el segundo mapa se dan los resultados en cuanto a la protección pasiva de la carretera (I_G) sobre la misma carretera teórica considerada en el primer mapa. La protección puede adoptar cuatro posibles valoraciones (protección máxima, elevada, media o deficiente). Cuanto peor sea la protección, mayores serán las consecuencias (gravedad) si se produce un accidente. Así como en el primer mapa, el indicador de I_G se calcula para el valor del límite de velocidad de la carretera.

El tercer y último mapa tiene en cuenta el historial de siniestros ocurridos en la carretera de estudio. En él se muestran los lugares en los que suelen ocurrir accidentes por salida de vía (que son los que se tratan en la tesina) y también aquellos en los que se producen accidentes con un porcentaje alto de siniestros o heridos graves.

Con la superposición de los tres mapas se debería poder interpretar los resultados conjuntamente y llegar a unas conclusiones que permitan corroborar la validez de los dos indicadores.

En el caso teórico de la figura 29 se ve como hay una mayor densidad de puntos negros (lugares con acumulación constante de accidentes con fallecidos y heridos graves) en tramos con una mala valoración en cuanto a I_G . De la misma manera, se comprueba que en aquellos tramos con peor resultado de I_R también se producen más accidentes. De esta manera, quedaría validado el cálculo de los dos indicadores.

Está claro que la figura 29 muestra un caso teórico y para llevar a cabo tal validación se debe disponer de unos medios y un tiempo del que se carece en esta tesina. No obstante, esta validación es mucho más aplicable que la descrita en primer lugar. Por otra parte, su inconveniente es que únicamente evalúa los dos indicadores I_R e I_G y no es capaz de validar el cambio en la velocidad límite definido en el capítulo 4.

En el siguiente apartado se aplica el cálculo de los dos indicadores a una carretera de Cataluña y a continuación se propone una velocidad límite que sea la adecuada. Se trata de una validación parcial del modelo y supone la primera vez que se aplica el modelo sobre un tramo real de carretera.

5.4 APLICACIÓN REAL

Gracias a la ayuda proporcionada por la fundación RACC se ha tenido acceso a los datos de accidentalidad y siniestralidad en todas las carreteras de Cataluña.

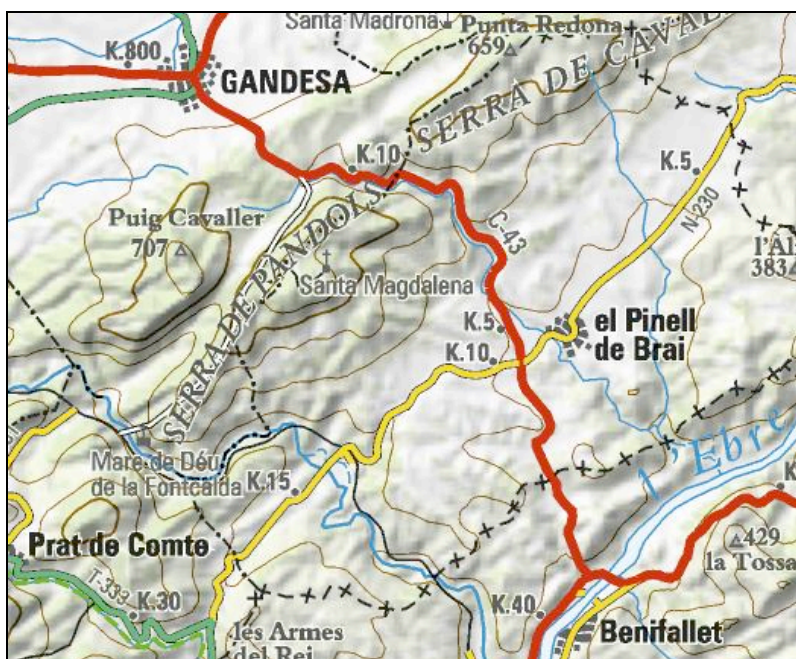
Con el objetivo de validar el modelo descrito en los capítulos anteriores, se ha aplicado la metodología propuesta a un tramo concreto de carretera. El tramo que se ha escogido es uno en el que se registran constantemente muchos accidentes por salida de vía, que es la tipología de accidente en la que se basa el modelo de cálculo.

Bajo la aplicación del modelo en este tramo concreto se intentará comprobar que las características de la infraestructura (evaluadas a partir de los índices I_R e I_G) tienen un peso importante dentro de la seguridad vial, y que están relacionadas con un historial de accidentalidad y siniestralidad concreto. Se trata, por lo tanto, de una manera parcial de validar el modelo propuesto.

5.4.1 Descripción de la carretera

De entre todos los tramos de carretera candidatos para ser evaluados, se ha escogido la carretera C-43 para aplicar el modelo. Esta carretera enlaza las poblaciones de Benifallet y Gandesa, situadas respectivamente en las comarcas de Baix Ebre y Terra Alta (Tarragona). Dada la corta longitud de la carretera (13,580 km) y su homogeneidad no es necesario subdividirla en tramos y, por consiguiente, se considera a la totalidad de la C-43 como un mismo tramo.

Figura 30. Vista completa de la carretera C-43



Fuente: Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC)

La C-43 está catalogada como una carretera convencional de calzada única y tiene un límite de velocidad de 90 km/h.

La problemática de esta carretera radica en su alta accidentalidad. Desde hace años, la Generalitat ha sumado esfuerzos para reducir esta tendencia elevada de accidentes mediante la conservación de la carretera, mejora de su trazado y de su protección pasiva. No obstante, las estadísticas de accidentalidad y siniestralidad siguen siendo alarmantes.

Tabla 39. Datos característicos de la carretera C-43

Carretera	Longitud (km)	Accidentes totales anuales (2003-2005)	Accidentes graves anuales (2003-2005)	IMD (intensidad media diaria)	KSI
C-43	13,580	7,3	3,7	2231	334,6

Fuente: Fundación RACC

Tabla 40. Accidentalidad por tipología de accidente en la carretera C-43

C-43	Accidentes fatales (con muertos y/o heridos graves)					
Año	Atropello	Salida de vía	Colisión frontal	Otras colisiones	Cruce	Otros
2003	1	0	1	0	0	0
2004	0	2	1	0	0	0
2005	0	6	0	0	0	0
Media	0,3	2,7	0,7	0,0	0,0	0,0

Fuente: Fundación RACC

El índice KSI (Killed or Seriously Injured) indica el número de accidentes fatales que se producirían en la carretera si un billón (anglosajón) de vehículos circulase por la carretera a lo largo de un año. Su formulación queda como:

$$KSI = \text{accidentes graves anuales} \frac{1 \cdot 10^9}{(IMD \text{ longitud } 365)} \quad (49)$$

Un resultado usual de KSI ronda el valor de 100. En la carretera de estudio, el alto valor de KSI delata una preocupante tasa de mortalidad y de malheridos.

Como se observa en la tabla 40, el accidente por salida de vía suele ser el más habitual en esta carretera. Cabe destacar que los accidentes registrados en las estadísticas a las que se ha tenido acceso únicamente tienen en cuenta aquellos con consecuencias graves (se producen muertos o heridos de gravedad). Los accidentes restantes no se incluyen en las estadísticas. De hecho, únicamente cuando se producen víctimas (muertos o malheridos), se realiza un parte policial en el que se especifica la tipología de accidente y, por lo tanto, es imposible conocer el tipo de accidente ocurrido cuando las consecuencias de éste no han sido graves.

5.4.2 Trabajo de campo

El día 07/09/2008 se llevó a cabo una inspección de la carretera C-43 con el objetivo de obtener las variables de entrada (Inputs) de las que depende el modelo. Además, se ha realizado un reportaje fotográfico de la carretera que puede consultarse en el anejo 4.

La obtención de las variables de entrada no ha supuesto problema alguno ya que éstas se escogieron para ser fácilmente medibles:

- Mediante una cinta métrica se han podido determinar las dimensiones del carril, arcén, y las distancias hasta los elementos rígidos del lateral de la carretera.
- Por otra parte, el cuentaquilómetros del vehículo sirvió para medir la longitud de las secciones de diferentes características a lo largo de la carretera. Por ejemplo, se obtuvo a partir del cuentaquilómetros la longitud de la carretera protegida con barreras laterales y también la longitud de carretera afectada por las distintos estados del pavimento.
- Por último, una inspección visual de la carretera permitió definir el estado del pavimento y las variables de visibilidad y señalización.

Tabla 41. Recopilación de variables

C-43	Riesgo. Variables de entrada	
Curvas	Radio mínimo (m)	170
	Categoría	2
	Curvas inesperadas	Sí
Plataforma	Carril (m)	3,25
	Arcén (m)	1
	Bandas sonoras	no
	Sobreancho	no
Pavimento	Estado bueno (m)	5000
	Estado aceptable (m)	7580
	Estado deteriorado (m)	1000
	Días de lluvia/año	68
Correctivo	Inclinación máxima (%)	8
	Visibilidad	aceptable
	Señalización	bueno

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Recopilación de variables

C-43	Protección. Variables de entrada	
	Distancia d (m)	Longitud (m)
	Pendiente	
	$0 \leq d \leq 1 \rightarrow I_1$	0
	$1 < d \leq 3 \rightarrow I_2$	1630
	$3 < d \leq 7 \rightarrow I_3$	5700
	$7 < d \leq 10 \rightarrow I_4$	2650
	$10 < d \rightarrow I_5$	0
	barrera $\rightarrow I_6$	3600

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Resultados del modelo

Velocidad límite	I_R	I_G	Celda del diagrama	Velocidad límite propuesta
90 km/h	26,4	7,7	9	80 km/h

Fuente: Elaboración propia

El radio de curvatura mínimo se ha calculado a partir de un plano digital de la carretera proporcionado por el ICC (Instituto Cartográfico de Cataluña). Las herramientas de programa Autocad permiten determinar el radio de las curvas de forma precisa y rápida.

Los días de lluvia al año se obtuvieron en el Servicio de Meteorología de Cataluña. El valor considerado es la media de los días con precipitación ocurridos en la población de Gadesa entre 1997 y 2002.

Tabla 44. *Días con precipitación en la carretera C-43*

	Estación meteorológica de Gadesa						
Año	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Media
Días de lluvia	78	55	64	70	62	80	≈ 68

Fuente: Meteocat. Servicio meteorológico de Cataluña

5.4.3 Interpretación de resultados

Los resultados del modelo de cálculo dan un valor de I_R y de I_G de 26,4 y 7,7 respectivamente para la velocidad de 90 km/h. Esto sitúa a la velocidad límite dentro de la celda 9 del diagrama de velocidades (figura 25). El detalle de estos cálculos se puede consultar en el anejo 5.

El riesgo a sufrir un accidente por salida de vía es, por lo tanto, elevado, mientras que la protección pasiva de la carretera tiene una valoración media. Esta valoración del riesgo y de la protección entra en concordancia con las estadísticas de siniestralidad de la carretera. Es decir, la alta accidentalidad registrada en la C-43 también se ve reflejada en las valoraciones dadas por el modelo propuesto, lo que significa que la infraestructura de la vía juega un papel importante dentro de la generación de accidentes en esta carretera.

En realidad, el factor responsable de esta mala evaluación del riesgo es el radio mínimo de curvatura de la carretera (170m). Este radio es demasiado pequeño teniendo en cuenta que la velocidad límite de carretera es de 90 km/h ($\delta_1 = 0,4$). De hecho, un radio tan pequeño no cumple con la normativa actual de trazado de carreteras. Esta deficiencia en el radio se compensa, en cambio, con una buena señalización en dichas curvas (mirar el reportaje fotográfico del anejo 4).

5.4.4 Velocidad límite propuesta

Siguiendo la política de seguridad vial propuesta en el capítulo 4, la velocidad límite dada por el modelo para la carretera C-43 es de 84 km/h. Ésta se obtiene después de calcular las velocidades límite y de aplicar las indicaciones de la tabla 38. Como se espera una cierta incertidumbre en el cálculo se propone aquí una velocidad límite de 80 km/h.

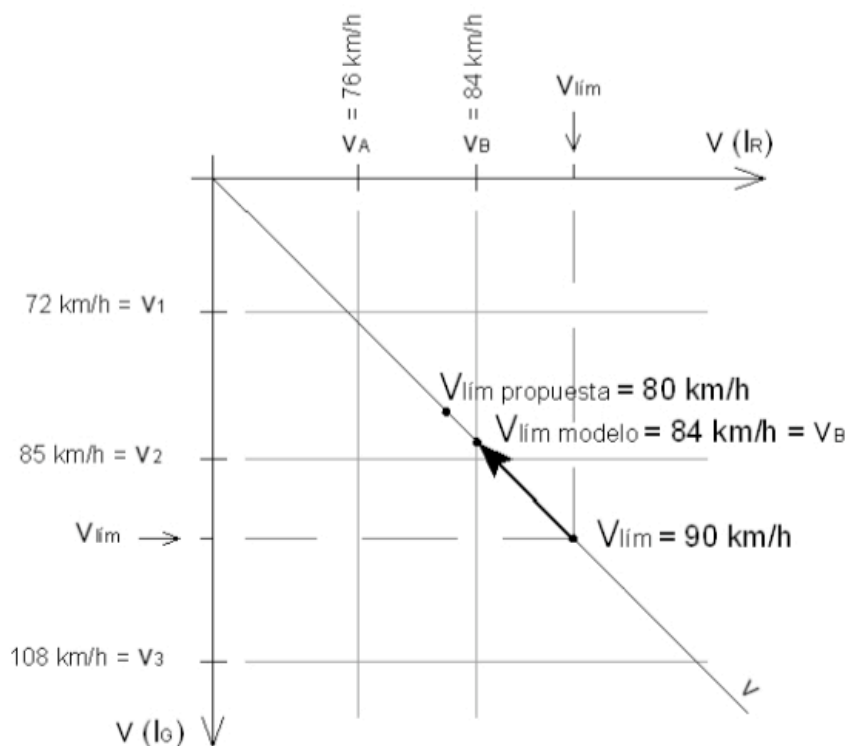
La tabla 45 recoge el valor de las velocidades límite de la carretera y en la figura 31 se muestra gráficamente cómo se llega al resultado obtenido. Los cálculos analíticos se encuentran detallados en el anejo 5.

Tabla 45. Velocidades límite de la carretera C-43

Velocidades límite C-43	
Riesgo	Protección
$I_A=5 \rightarrow v_A=76 \text{ km/h}$	$I_1=3 \rightarrow v_1=72 \text{ km/h}$
$I_B=15 \rightarrow v_B=84 \text{ km/h}$	$I_2=6 \rightarrow v_2=85 \text{ km/h}$
	$I_3=14 \rightarrow v_3=108 \text{ km/h}$

Fuente: Elaboración propia

Fig. 31. Diagrama de velocidades límite



Fuente: Elaboración propia

Si se quiere continuar adoptando un límite de velocidad de 90 km/h habría que modificar aquellas características de la infraestructura que dan una valoración del riesgo a sufrir un accidente elevado. Se trataría, pues, de efectuar unas obras de mejora en el diseño y trazado de la carretera hasta que la velocidad límite se situase en la celda número 5. De esta manera, la velocidad límite sería menor o igual a v_B ($V_{\text{lim}} \leq v_B$).

5.5 CONSIDERACIÓN FINAL

La aplicación del modelo propuesto en el estudio en un tramo real ha servido para corroborar el buen funcionamiento de éste. Según el modelo, la velocidad límite actual de la carretera C-43 supone un riesgo demasiado elevado y, por ello, se propone una reducción de la velocidad o una mejora de los factores activos de la vía.

No obstante, con la aplicación del modelo en un único tramo no se puede validar toda la metodología de cálculo. De todas maneras, los buenos resultados obtenidos después de la aplicación adelantan que el modelo propuesto no carece de sentido y que puede servir como punto de partida para poder redefinir una velocidad límite adecuada en las carreteras.

6 CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

En virtud del trabajo llevado a cabo y de los resultados obtenidos, se ha realizado un análisis crítico de toda la tesina que deriva en las siguientes seis conclusiones:

- Durante la fase de recopilación de información para la realización de la tesina se pudo comprobar que, a pesar de la evidente importancia de la relación entre la velocidad y el riesgo a sufrir un accidente y de las consecuencias de éste, existe una carencia generalizada de estudios científicos al respecto.
- Se han calculado dos indicadores de seguridad de la infraestructura viaria determinados a partir de una tipología de accidente concreta: la salida de vía. El índice de riesgo I_R evalúa los factores activos de la carretera y su base matemática se fundamenta sobre los conceptos de la lógica difusa (*Fuzzy Set*). El índice de gravedad I_G , en cambio, evalúa los factores pasivos de la infraestructura y su cálculo parte de los estudios del consorcio EuroRAP. Dada la falta de información mencionada en el punto anterior, algunos de los factores sobre los que se estructura el cálculo se basan en suposiciones algo intuitivas pero que aun así no restan validez al conjunto del modelo. Es de esperar que con el paso del tiempo, más investigaciones científicas en este ámbito sean llevadas a cabo, lo cual permitirá ajustar con mayor precisión la metodología de cálculo de los dos indicadores.
- Los indicadores de seguridad definidos en el capítulo 3 suponen el punto de partida para redefinir una velocidad límite adecuada en la carretera. Su valor debe tomarse como una recomendación; la redefinición del límite de velocidad necesita de un estudio más global que tenga en cuenta, además de las características de la infraestructura, otros elementos relativos al comportamiento del conductor y del vehículo. De todas maneras, el modelo de redefinición de la velocidad constituye una **primera herramienta válida**, tanto para proyectistas como para las administraciones titulares de las carreteras, **para fijar las velocidades permitidas en la vía**.

-
- En la validación llevada a cabo en el capítulo 5 se aplica el modelo desarrollado en una sección real de carretera. De los resultados obtenidos se comprueba que un tramo conocido por su alto historial de heridos graves y fallecidos obtiene una puntuación negativa de los índices de seguridad I_R e I_G . Se extrae, a continuación, que la velocidad límite actual del tramo supone un riesgo demasiado elevado dadas las características de la infraestructura y se propone su reducción o una mejoría de los factores activos de la vía.

 - La **velocidad límite** de una carretera debería estar adecuada con el **nivel de seguridad y de protección** presente en ella. De esta manera, la **accidentalidad** y la **sinistralidad** en las carreteras **se reduciría** ya que el papel que juega la infraestructura como responsable en la generación de accidentes sería mínimo y las consecuencias de éstos también.

 - La tesina desarrollada supone el primer estudio que se encamina en esta dirección y se espera que sirva como **punto de partida para futuras líneas de investigación**. Concretamente, las futuras investigaciones podrían ir encaminadas hacia una sofisticación de los cálculos de las velocidades de inicio de riesgo y de máximo riesgo (v_1, v_2) definidas en el tercer capítulo. También se podría realizar un análisis de sensibilidad de los índices frontera I_A e I_B y resultaría interesante estudiar las implicaciones que tiene la forma de las celdas en el diagrama de velocidades (capítulo 4). Finalmente, la misma metodología desarrollada en la tesina podría ser aplicada a otras tipologías de accidente para así globalizar el uso de indicadores de seguridad dentro de la infraestructura viaria.

7 REFERENCIAS

- Astrom, H. y C.G. Walman (2001). Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety. A literature review. *Swedish National Road and Transport Research Institute*. ISSN: 0347-6049.
- Baldwin, D.M. (1946). The relation of highway design to accident experience. *AASHO Convention Group Meetings, Papers and Discussions*, pág.103-109.
- Bligh, R.P., S. Miaou y K.K. Mak (2005). Determination of Safe/Cost Effective Roadside Slopes and Associated Clear Distances. Draft Final Report. NCHRP Project 17-11. *Transportation Research Board of the National Academies*. Washington, D.C.
- Bonneson, J. y D. Lord (2005). Role and application of accident modification factors in the highway design process. *Texas Transportation Institute*. Report No. FHWA/TX-05/0-4703-2.
- CARE (2007). *EU road accidents database*. European Comission. Directorate-General Energy and Transport.
- Casquero de la Cruz, E. y R. Rodríguez Moya (2006). Indicadores para la Seguridad Vial. *ACEX. Jornada Técnica sobre Indicadores en la Gestión de la Conservación de Carreteras*.
- Dutch Ministry of Transport (2005). Sustainable safe road design. A practical manual. World Bank.
- ERSO. European Road Safety Observatory. Safety Ratings, 2008. <http://www.erso.eu>
- European road assessment core programme 2002/3 (2004). Road protection score handbook, beta version. RACC Automòbil Club.
- Hauer, E. (2000-a). Safety of horizontal curves. [personal opinions] *Road Safety Research*. Publicado personalmente.
- Hauer, E. (2000-b). Lane width and safety. [personal opinions] *Road Safety Research*. Publicado personalmente.
- Kraemer, C. et al. (1999). *Carreteras I*. 1ª ed. Colección Escuelas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- Lydon, M. (1997). Rural crashes and available countermeasures. *14th State Municipal Engineering Conference*. Perth, Australia.

Messer, C. J., J.M. Mounce y R.Q. Brackett (1979). Highway geometric design consistency related to driver expectancy. Volume III - Methodology for evaluating geometric design consistency. Report FHWA-RD-81-037, FHWA. Washington.

Monclús, J. et al. (2008). *El valor de la seguridad. Conocer los costes de los accidentes de tráfico para invertir más en su prevención*. Fundación FITSA (24 páginas). ISBN: 978-84-611-6857-6.

Nilsson, G. (2004). Tesis doctoral: Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety. (página 56). *Lund Institute of Technology*. ISSN: 1404-272X.

Ogden, K. (1990). Road environment factors – rural. *RTA Road Hazards Conference*. Wollongong, Australia.

Oxley, J. et al. (2003). Cost-effective infrastructure measures on rural roads. (pág.120). *Monash University Accident Research Centre*.

Pérez, R. (2005). Tesis doctoral: Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos. Capítulo 2. *UPC*. Barcelona.

Puerto, L. y A. París (2007). *El programa EuroRAP. El proyecto RPS*. Fundación RACC (46 pág).

Tomás, R., L. Bañón y J. Ferreiro (2004). La estabilidad del vehículo en las curvas: aspectos geométricos y su influencia en el coeficiente de seguridad. *INGEGRAF. XVI Congreso de internacional de ingeniería gráfica*. Zaragoza-Huesca.

Wegman, F. (1995). Influence of infrastructure design on road safety. *International Symposium on Traffic Safety: A Global Issue, Kuwait*. (No. D-95-1). Leidschendam, Netherlands: Institute for Road Safety Research (SWOV).

Zegeer, C.V., R. C. Deen. y J. G. Mayes (1981). Effect of lane width and shoulder widths on accident reduction on rural, two-lane roads. *Transportation Research Record*, No. 806, 33-43.